

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BAŞLIĞIN BORU HATTI ETRAFINDAKİ AKIMA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Mücella İLKENTAPAR**

**Danışman
Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER**

Doktora Tezi

**Eylül 2022
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BAŞLIĞIN BORU HATTI ETRAFINDAKİ AKIMA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

(Doktora Tezi)

**Hazırlayan
Mücella İLKENTAPAR**

**Danışman
Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER**

**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından
FDK-2019-9434 kodlu proje ile desteklenmiştir**

**Eylül 2022
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Mücella İLKENTAPAR

“Başlığın Boru Hattı Etrafındaki Akıma Etkisinin İncelenmesi” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Mücella İLKENTAPAR

Danışman

Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER

İnşaat Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca her aşamada bana yardımcı olan, bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, karşılaştığım her türlü zorlukta her zaman yanımda olarak destek veren, bir danışmandan öte bir ağabey olan, çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER' e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında sayısal modelleme ve deneysel olarak karşılaştığım her türlü zorlukta yardımını ve desteğini esirgemeyen, tezdeki her çalışmada emek harcayan değerli meslektaşım ve arkadaşım Arş. Gör. Serhat AKŞİT' e teşekkür ederim.

Çalışma esnasında desteklerini esirgemeyen, her türlü zorlukta yardımcı olan Erciyes Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Rüzgâr Mühendisliği ve Aerodinamik Laboratuvarı sorumlu hocaları Sayın Prof. Dr. Serdar GENÇ, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Halil Hakan AÇIKEL ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Kemal KOCA' ya yardımlarından ve desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Çalışmalar sırasında tez komitesi üyeliğini üstlenen değerli hocalarım Prof. Dr. Oktay ÖZKAN ve Doç. Dr. Hatice ÇITAKOĞLU' na teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: FDK-2019-79434) teşekkür ederim.

Hayatımın her alanında desteğini esirgemeyen, bu süreç boyunca ve tüm eğitim hayatım boyunca sevgi, fedakârlık ve anlayışını gösteren annem Neriman VAPUR ve babam Hüseyin VAPUR' a, sevgili eşim Doç. Dr. Serhan İLKENTAPAR' a ve canım oğlum Ali Said İLKENTAPAR'a sonsuz teşekkür ederim.

Mücella İLKENTAPAR

Eylül 2022, KAYSERİ

BAŞLIĞIN BORU HATTI ETRAFINDAKİ AKIMA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mücella İLKENTAPAR

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Eylül 2022
Danışman: Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER**

ÖZET

Açık deniz boru hatları, meydana gelebilecek hasarları önlemek amacıyla deniz tabanına gömülmektedir. Erozyon ya da hareketli deniz tabanının yer değiştirmesi yerel oyulmaları ve dolayısıyla boru hattının kendi kendine gömülmesini sağlayabilmektedir. Oyulmanın oran ve miktarının artırılması amacıyla, boru hattı üzerine başlık yerleştirilmektedir. Bu tez çalışmasında, boru hattı üzerine başlık yerleştirilmesinin boru hattına olan etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Kanal tabanı etkisinin ihmal edildiği çalışmada Reynolds 14000 değeri ile çalışılmıştır. Silindir etrafındaki akımı görselleştirmek için duman-teli deneyi, aerodinamik katsayıları belirlemek için aerodinamik kuvvet deneyi, akım hız profilini incelemek için sıcak tel anemometresi deneyi, silindir etrafındaki basınç dağılımını incelemek için basınç ölçüm deneyi yapılmıştır. Deneyler başlıksız tek silindir ve başlıklı tek silindir için yapılmış ayrıca silindirlerin arka arkaya yerleştirilmesi durumu da araştırılmıştır. Silindirler arası boşluk oranı $L/D = 2, 4$ ve 7 için hem memba hem mansap silindirinin başlıksız olduğu durum, hem memba hem mansap silindirinin başlıklı olduğu durum, memba silindiri başlıksız mansap silindiri başlıklı olan durum ve memba silindiri başlıklı mansap silindiri başlıksız olan durum için deneyler yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar *ANSYS FLUENT* paket programı ile modellenmiştir. Deney sonuçları silindire başlık eklenmesinin silindire etkiyen sürüklenme kuvvetini artırdığını ayrıca negatif kaldırma kuvveti oluşturduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Boru Hattı, Başlık, HAD

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SPOILERS ON FLOW AROUND A PIPELINE

Mücella ILKENTAPAR

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

PhD Thesis, September 2022

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER

ABSTRACT

Offshore pipelines are buried in the seabed to prevent damage. Erosion or displacement of the moving seafloor can cause local scours and thus self-embedding of the pipeline. In order to increase the rate and amount of scour, a spoiler is placed on the pipeline. In this thesis, the effect of placing a spoiler on the pipeline was investigated experimentally and numerically. In the study, in which the channel floor effect was neglected, the Reynolds value of 14000 was used. Smoke-wire test to visualize the flow around the cylinder, aerodynamic force test to determine the aerodynamic coefficients, hot-wire test to examine the flow velocity profile, and pressure measurement experiment to examine the pressure distribution around the cylinder were performed. Experiments were made for a single cylinder without a spoiler and a single cylinder with a spoiler, and tandem cylinders was also investigated. For the gap ratio between cylinders $L/D=2, 4$ and 7 , for the case where both upstream and downstream cylinder are without spoiler, both upstream and downstream cylinder are with spoiler, upstream cylinder is without spoiler, downstream cylinder is with spoiler, and upstream cylinder is without spoiler, downstream cylinder is without spoiler experiments have been done. Experimental studies were modelled with the *ANSYS FLUENT* package program. The experimental results show that adding a spoiler to the cylinder increases the drag force acting on the cylinder and also creates a negative lift force.

Keywords: Pipeline, Spoiler, CFD

İÇİNDEKİLER

BAŞLIĞIN BORU HATTI ETRAFINDAKİ AKIMA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Küt Cisim Aerodinamiği	2
1.3. Girdap Kopma Olayı	3
1.4. Dairesel Silindir Etrafındaki Akımın Rejimi	5
1.5. Literatür Araştırması	8
1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı	18

BÖLÜM 2

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. DeneySEL Yöntem ve Materyal	19
2.1.1. Deney Kanalı ve Özellikleri.....	21
2.1.2. Belirsizlik Analizi	21
2.1.3. Blokaj Etkisi	22
2.1.4. Deney Numuneleri ve Özellikleri.....	23
2.1.5. Duman Teli ile Akım Görselleştirme Deneyi	24
2.1.5.1. Duman Teli Deneyi ile Elde Edilen Görüntüler	26

2.1.6. Sıcak Tel Anemometresi ile Hız Ölçümü (Hotwire) Deneyi.....	26
2.1.7. Aerodinamik Kuvvet Ölçüm Deneyi	29
2.1.8. Basınç Ölçüm Deneyi	31
2.2. Sayısal Yöntem	33
2.2.1. Geometri.....	34
2.2.2. Çözüm Ağı	35
2.2.2.1. Ağ Yakınsama İndeksi (GCI).....	39
2.2.3. Temel Denklemler	41
2.2.3.1. Kütleinin Korunumu	41
2.2.3.2. Enerjinin Korunumu	43
2.2.3.3. Momentumun Korunumu	43
2.2.3.4. Navier-Stokes Denklemleri.....	44
2.2.3.5. Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) Denklemleri	47
2.2.3.5.1. Sıkışmayan Türbülanslı Akımda Hareket Denklemleri.....	48
2.2.4. Türbülans Kapatma Modelleri	51
2.2.4.1. Standart k- ϵ Türbülans Modeli (SKE).....	51
2.2.4.2. Standart k- ω Türbülans Modeli (SKW)	53
2.2.4.3. SST k- ω Türbülans Modeli (SST)	53
2.2.5. Başlangıç ve Sınır Şartları.....	55

BÖLÜM 3

BULGULAR

3.1. Giriş	58
3.2. Deneysel Bulgular	58
3.2.1. Duman Teli ile Akış Görselleştirilmesi Deney Bulguları.....	59
3.2.2 Sıcak Tel Anemometresi Deney Bulguları	62
3.2.2.1. Hız Dağılımı Sonuçları.....	63
3.2.2.2 Girdap Kopma Frekansı Sonuçları	68
3.2.3. Aerodinamik Kuvvet Ölçüm Deney Bulguları	77
3.2.4. Basınç Ölçüm Deney Bulguları.....	82
3.3. Sayısal Modelleme ve Bulgular	88
3.3.1 Yakın Duvar İşlemler	89
3.3.2 Sayısal Analiz Hız Dağılımı Sonuçları	90

3.3.2.1. Sayısal Analiz Girdap Kopma Frekansı Sonuçları	91
3.3.3 Sayısal Analiz Aerodinamik Kuvvet Bulguları	94
3.3.4 Sayısal Analiz Basınç Bulguları	95

BÖLÜM 4

TARTIŞMA

4.1. Tek Silindir İçin Başlık Durumunun Etkisi	96
4.2. Silindirlerin Arka Arkaya Yerleştirilmesi Durumlarında $L/D=2$ İçin Başlık Etkisi	97
4.3. Silindirlerin Arka Arkaya Yerleştirilmesi Durumlarında $L/D=4$ İçin Başlık Etkisi	101
4.4. Silindirlerin Arka Arkaya Yerleştirilmesi Durumlarında $L/D=7$ İçin Başlık Etkisi	105
4.5. Başlıksız İki Silindirin Arka Arkaya Yerleştirilmesi ($N \times N$) Durumunda Boşluk Etkisi	108
4.6. Başlıklı İki Silindirin Arka Arkaya Yerleştirilmesi ($S \times S$) Durumunda Boşluk Etkisi	109
4.7. Memba Başlıklı ve Mansap Başlıksız Silindirin Arka Arkaya Yerleştirilmesi ($S \times N$) Durumunda Boşluk Etkisi.....	111
4.8. Memba Başlıksız ve Mansap Başlıklı Silindirin Arka Arkaya Yerleştirilmesi ($N \times S$) Durumunda Boşluk Etkisi.....	113

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar	115
5.2. Öneriler	117
KAYNAKLAR	118

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Silindirlerin durumlarına göre isimlendirme kodlaması.....	20
Tablo 2.2. Farklı katsayılara ait belirsizlikler	22
Tablo 2.3. Farklı ağ yapıları için hesaplanan GCI_{ince} değerleri	41
Tablo 3.1. Memba silindirleri art izi bölgesinde hesaplanan Strouhal sayıları.....	76
Tablo 3.2. Mansap silindirleri art izi bölgesinde hesaplanan Strouhal sayıları	76
Tablo 3.3. Memba silindirlerine ait sürüklenme katsayısı değerleri.....	77
Tablo 3.4. Memba silindirlerine ait kaldırma katsayısı değerleri	77
Tablo 3.5. Mansap silindirlerine ait sürüklenme katsayısı değerleri	77
Tablo 3.6. Mansap silindirlerine ait kaldırma katsayısı değerleri.....	78
Tablo 3.7. Basınç ölçüm noktaları açıları	82
Tablo 3.8. Sayısal analiz verilerine göre hesaplanan Strouhal sayıları.....	94
Tablo 3.9. Silindirlere ait sürüklenme ve kaldırma katsayısı değerleri.....	94

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Akış alanında bulunan küt cisme etki eden kuvvetler	2
Şekil 1.2.	Cisim yüzeyinden ayrılmanın gerçekleşmesi olayı	4
Şekil 1.3.	Silindir etrafındaki akımın karakteristik özellikleri.....	6
Şekil 2.1.	Deney yapılan durumlar ve isimlendirme.....	20
Şekil 2.2.	Deneylerde kullanılan rüzgâr tüneli.....	21
Şekil 2.3.	Üretilmiş olan başlıklı ve başlıksız silindir numuneler	23
Şekil 2.4.	Üretilen numunelerde bulunan basınç okuma delikleri	24
Şekil 2.5.	Duman teli deneyi için oluşturulmuş karanlık ortam ve bölgesel aydınlatma.....	25
Şekil 2.6.	Duman teli deneyi şematik gösterimi	26
Şekil 2.7.	Başlıksız İki Silindir $L=2D$ (N2N) durumunda 3 farklı açıdan alınmış görüntü	26
Şekil 2.8.	Sıcak Tel Anemometresi Problemleri.....	27
Şekil 2.9.	Sıcak tel anemometresi deneyi şematik gösterimi.....	28
Şekil 2.10.	Kullanılan travers sistemi ve sistem üzerine yerleştirilen ikili ölçüm sistemi	28
Şekil 2.11.	Sıcak tel anemometresi problemlerinin deney sistemine yerleştirilmesi.....	29
Şekil 2.12.	Üç bileşenli kuvvet ölçüm sistemi	30
Şekil 2.13.	Sürüklenme kuvveti ve kaldırma kuvveti için kalibrasyon düzeneği	31
Şekil 2.14.	Silindirlerin kuvvet ölçüm sistemine yerleştirilmesi	31
Şekil 2.15.	Basınç ölçüm deney düzeneği.....	33
Şekil 2.16.	Basınç ölçümünde kullanılan basınç algılayıcı ve pnömatik valf sistemi .	33
Şekil 2.17.	FLUENT programı ara yüzü.....	34
Şekil 2.18.	Sayısal analiz kanal geometrisi.....	34
Şekil 2.19.	Tekli silindirlerde oluşturulan çözüm ağı	35
Şekil 2.20.	$L/D=2$ olması durumunda oluşturulan çözüm ağı	37
Şekil 2.21.	$L/D=4$ olması durumunda oluşturulan çözüm ağı	38
Şekil 2.22.	$L/D=7$ olması durumunda oluşturulan çözüm ağı	39
Şekil 2.23.	Uzayda sonlu kontrol hacmi [52].....	42
Şekil 2.24.	Sayısal analiz çözüm bölgesi ve sınır şartları	56
Şekil 2.25.	Sayısal analiz referans değerleri, malzeme özellikleri ve işlem akış şeması.....	57

Şekil 3.1.	Tekli silindirlerde elde edilen duman deneyi görüntüleri.....	59
Şekil 3.2.	L/D=2 durumunda elde edilen duman deneyi görüntüleri.....	60
Şekil 3.3.	L/D=4 durumunda elde edilen duman deneyi görüntüleri.....	61
Şekil 3.4.	L/D=7 durumunda elde edilen duman deneyi görüntüleri.....	62
Şekil 3.5.	N durumu hız dağılımı.....	63
Şekil 3.6.	S durumu hız dağılımı.....	63
Şekil 3.7.	N2N durumunda hız dağılımı	64
Şekil 3.8.	N2S durumunda hız dağılımı.....	64
Şekil 3.9.	S2N durumunda hız dağılımı.....	64
Şekil 3.10.	S2S durumunda hız dağılımı.....	65
Şekil 3.11.	N4N durumunda hız dağılımı	65
Şekil 3.12.	N4S durumunda hız dağılımı.....	66
Şekil 3.13.	S4N durumunda hız dağılımı.....	66
Şekil 3.14.	S4S durumunda hız dağılımı.....	66
Şekil 3.15.	N7N durumunda hız dağılımı	67
Şekil 3.16.	N7S durumunda hız dağılımı.....	67
Şekil 3.17.	S7N durumunda hız dağılımı.....	67
Şekil 3.18.	S7S durumunda hız dağılımı.....	68
Şekil 3.19.	N durumu spektral sonuçları.....	69
Şekil 3.20.	S durumu spektral sonuçları	69
Şekil 3.21.	N2N durumunda spektral sonuçları	70
Şekil 3.22.	N2S durumunda spektral sonuçları.....	70
Şekil 3.23.	S2N durumunda spektral sonuçları.....	71
Şekil 3.24.	S2S durumunda spektral sonuçları	71
Şekil 3.25.	N4N durumunda spektral sonuçları	72
Şekil 3.26.	N4S durumunda spektral sonuçları.....	72
Şekil 3.27.	S4N durumunda spektral sonuçları.....	73
Şekil 3.28.	S4S durumunda spektral sonuçları	73
Şekil 3.29.	N7N durumunda spektral sonuçları	74
Şekil 3.30.	N7S durumunda spektral sonuçları.....	74
Şekil 3.31.	S7N durumunda spektral sonuçları.....	75
Şekil 3.32.	S7S durumunda spektral sonuçları	75
Şekil 3.33.	Başlık eklenmesi durumunun sürüklenme katsayısına etkisi	78

Şekil 3.34.	Başlık eklenmesi durumunun kaldırma katsayısına etkisi.....	78
Şekil 3.35.	Boşluk oranı ve başlık konfigürasyonunun memba silindirindeki sürüklenme katsayısına etkisi	79
Şekil 3.36.	Boşluk oranı ve başlık konfigürasyonunun mansap silindirindeki sürüklenme katsayısına etkisi	79
Şekil 3.37.	Boşluk oranı ve başlık konfigürasyonunun memba silindirindeki kaldırma katsayısına etkisi.....	80
Şekil 3.38.	Boşluk oranı ve başlık konfigürasyonunun mansap silindirindeki kaldırma katsayısına etkisi.....	80
Şekil 3.39.	Başlıklı ve başlıksız tek silindir için basınç katsayısı dağılımı	83
Şekil 3.40.	N2N durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı	83
Şekil 3.41.	N2S durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı	84
Şekil 3.42.	S2N durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı	84
Şekil 3.43.	S2S durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı.....	84
Şekil 3.44.	N4N durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı	85
Şekil 3.45.	N4S durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı	85
Şekil 3.46.	S4N durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı	86
Şekil 3.47.	S4S durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı.....	86
Şekil 3.48.	N7N durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı	87
Şekil 3.49.	N7S durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı	87
Şekil 3.50.	S7N durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı	87
Şekil 3.51.	S7S durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı.....	88
Şekil 3.52.	N ve S durumlarına ait y^+ değeri grafiği.....	89
Şekil 3.53.	N2N ve S2S durumlarına ait y^+ değeri grafiği.....	89

Şekil 3.54.	N durumu sayısal analiz hız dağılımı	90
Şekil 3.55.	S durumu sayısal analiz hız dağılımı	90
Şekil 3.56.	N2N durumunda sayısal analiz hız dağılımı.....	91
Şekil 3.57.	S2S durumunda sayısal analiz hız dağılımı	91
Şekil 3.58.	N durumu sayısal analiz FFT spektral sonuçları	92
Şekil 3.59.	S durumu sayısal analiz FFT spektral sonuçları	92
Şekil 3.60.	N2N durumu sayısal analiz FFT spektral sonuçları.....	93
Şekil 3.61.	S2S durumu sayısal analiz FFT spektral sonuçları	93
Şekil 3.62.	Başlıklı ve başlıksız tek silindir için sayısal analiz basınç katsayısı dağılımı	95
Şekil 4.1.	Başlıklı ve başlıksız silindir hız dağılımı.....	97
Şekil 4.2.	2D boşluk durumunda silindirler arasındaki bölgede hız dağılımı- başlık etkisi	100
Şekil 4.3.	2D boşluk durumunda mansap silindiri arka bölgesinde hız dağılımı- başlık etkisi	101
Şekil 4.4.	4D boşluk durumunda silindirler arasındaki bölgede hız dağılımı- başlık etkisi	104
Şekil 4.5.	4D boşluk durumunda mansap silindiri arka bölgesinde hız dağılımı- başlık etkisi	104
Şekil 4.6.	7D boşluk durumunda silindirler arasındaki bölgede hız dağılımı- başlık etkisi	107
Şekil 4.7.	7D boşluk durumunda mansap silindiri arka bölgesinde hız dağılımı- başlık etkisi	108

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	Kesit alanı
a	İvme
C_D	Sürüklenme katsayısı
C_L	Kaldırma katsayısı
C_p	Basınç katsayısı
D	Silindir çapı
d	Ağ aralığı
f	Girdap kopma frekansı
F_D	Sürüklenme kuvveti
F_L	Kaldırma kuvveti
F_s	Güvenlik faktörü
g	Yerçekimi ivmesi
k	Türbülans kinetik enerjisi
L	Silindirler arası mesafe
m	Kütle
n	Birim normal vektör
η	Türbülans viskozitesi
p	Basınç
ϕ	Yitim fonksiyonu
Re	Reynolds sayısı
St	Strouhal sayısı
u	x doğrultusunda akım hızı
u_∞	Serbest akım hızı
V	Hacim
v	y doğrultusunda akım hızı
w	z doğrultusunda akım hızı
δ	Sınır tabakası kalınlığı
ε	Türbülans kinetik enerji kayıp oranı
λ	Isı iletim katsayısı
μ	Dinamik viskozite katsayısı

ρ	Akışkan yoğunluğu
σ	Gerilme tensörü
ω	Özgöl kayıp oranı

Kısaltmalar

HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
FFT	Fast fourier transform
GCI	Ağ yakınsama indeksi
N	Başlıksız tek silindir
N2N	Memba ve mansap silindiri başlıksız
N2S	Memba silindiri başlıksız mansap silindiri başlıklı
N4N	Memba ve mansap silindiri başlıksız
N4S	Memba silindiri başlıksız mansap silindiri başlıklı
N7N	Memba ve mansap silindiri başlıksız
N7S	Memba silindiri başlıksız mansap silindiri başlıklı
RANS	Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri
S	Başlıklı tek silindir
S2N	Memba silindiri başlıklı mansap silindiri başlıksız
S2S	Memba ve mansap silindiri başlıklı
S4N	Memba silindiri başlıklı mansap silindiri başlıksız
S4S	Memba ve mansap silindiri başlıklı
S7N	Memba silindiri başlıklı mansap silindiri başlıksız
S7S	Memba ve mansap silindiri başlıklı
SKE	Standart k- ϵ türbülans modeli
SKW	Standart k- ω türbülans modeli
SST	Shear stress transport

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Bütün katı cisimler hava, su veya diğer tür akışkanlara maruz kalır ve bunların çoğu akışkanlar mekaniği açısından küt cisimler olarak nitelendirilirler. Küt cisimler mansap kısımlarında geniş ve genellikle kararsız ayrılma bölgeleri oluşturan cisimlerdir. Küt cisimler üçgen, dikdörtgen, çokgen, eliptik veya dairesel kesit şekillerine sahip olabilir ve bu cisimlerle etkileşime giren akımlar genellikle benzer özelliklere sahiptir. Silindir etrafındaki akış mühendislik projelerindeki önemi nedeniyle uzun süredir sayısal ve deneysel olarak araştırma konusu olmuştur. Pratik olarak dairesel ve kare olan silindirler mekanik, inşaat ve kıyı mühendisliği gibi dallarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

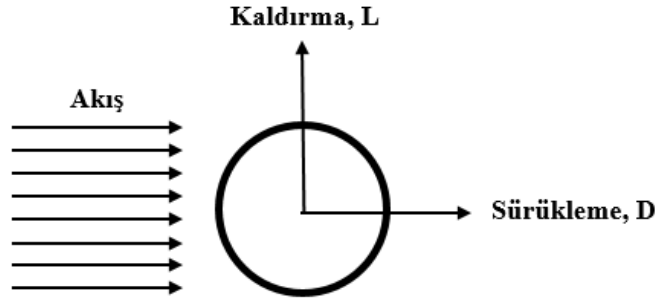
Kıyı mühendisliğinin uygulama ve araştırma konularından biri olan denizaltı boru hatları günümüzde yaygın olarak kullanılan dairesel silindir şeklindeki önemli deniz yapılarındandır. Bu yapılar; deniz deşarj hatları, soğutma suyu boru hatları, petrol nakil hatları, doğalgaz boruları gibi enerji nakil ve haberleşme amaçlı kabloların taşınması amaçlarıyla inşa edilirler. Bu yapıların uygulamaları ve tasarımlarında karşılaşılan zorluklar nedeniyle; halen araştırmacılar tarafından çalışılan güncel bir konu olma özelliğini sürdürmektedir. Ayrıca kullanım amaçlarının küresel ölçekte olması düşünülürse; zarar görmeleri durumunda önemli boyutta sorunlar oluşabilmekte ve büyük maliyetler ile karşı karşıya kalınmaktadır. Bu sebeptendir ki denizaltı boru hatlarının stabilizesi ile ilgili çalışmalar birçok mühendislik dalında uygulama alanı bulmaktadır.

Denizaltına döşenen boru hatları ve kablolar, dalga ve akıntı gibi çevresel yüklerin etkisi altında stabilizelerini koruyarak proje ömrü boyunca hizmet vermelidir. Ancak bu yapılar karada inşa edilen yapılara nazaran daha olumsuz çevresel etkilere maruz kalmaktadırlar. Bu yapıların maruz kaldığı en önemli etken; akışkan ile etkileşiminden doğan dinamik kuvvetlerdir. Oluşan bu dinamik kuvvetleri kontrol altına almak amacıyla çeşitli

çalışmalar yapılarak girdap kopma frekansı, basınç dağılımı, kaldırma ve sürüklenme katsayısı gibi aerodinamik özellikler istenilen düzeye çekilmeye çalışılmıştır.

1.2. Küt Cisim Aerodinamiği

Bir cisme küt cisim denilebilmesi için akış alanı içerisinde akış doğrultusuna dik ve nispeten geniş bir yüzey alanına sahip olması ve akışı engelleme eğiliminde olması gerekmektedir. Küt cisim etrafındaki akışta akım çizgileri cismin yüzeyini takip etmez ve cismin geometrik şekli akışın yüzeyden ayrılmasına yol açar. Akış alanı içerisinde bulunan küt cisimlere akış kaynaklı çeşitli kuvvetler etki etmektedir. Bu kuvvetler Şekil 1.1’de görüldüğü gibi cisme akış doğrultusunda etki eden sürüklenme kuvveti ve akışa dik yönde etki eden kaldırma kuvvetidir.



Şekil 1.1. Akış alanında bulunan küt cisme etki eden kuvvetler

Sürüklenme kuvveti cismin ön yüzeyinde ortaya çıkan yüksek basınç ve arka yüzeyindeki ayrılma bölgesinde ortaya çıkan düşük basınç değerinin farkı ile yüzey sürtünmelerinden kaynaklanan direncin toplamı olarak ifade edilmektedir. Aerodinamik yapıları cisimlerde viskoz etki ve sürtünme kuvvetinden kaynaklı sürüklenme oluşurken; dairesel silindirlerde basınç farkından kaynaklanan sürüklenme kuvveti daha önemli olmaktadır. Bir cisme etki eden sürüklenme kuvveti;

$$F_D = F_{D,sürtünme} + F_{D,basınç} \quad (1.1)$$

$$F_D = \frac{C_D}{2} A \rho D u^2 \quad (1.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada C_D sürüklenme katsayısıdır.

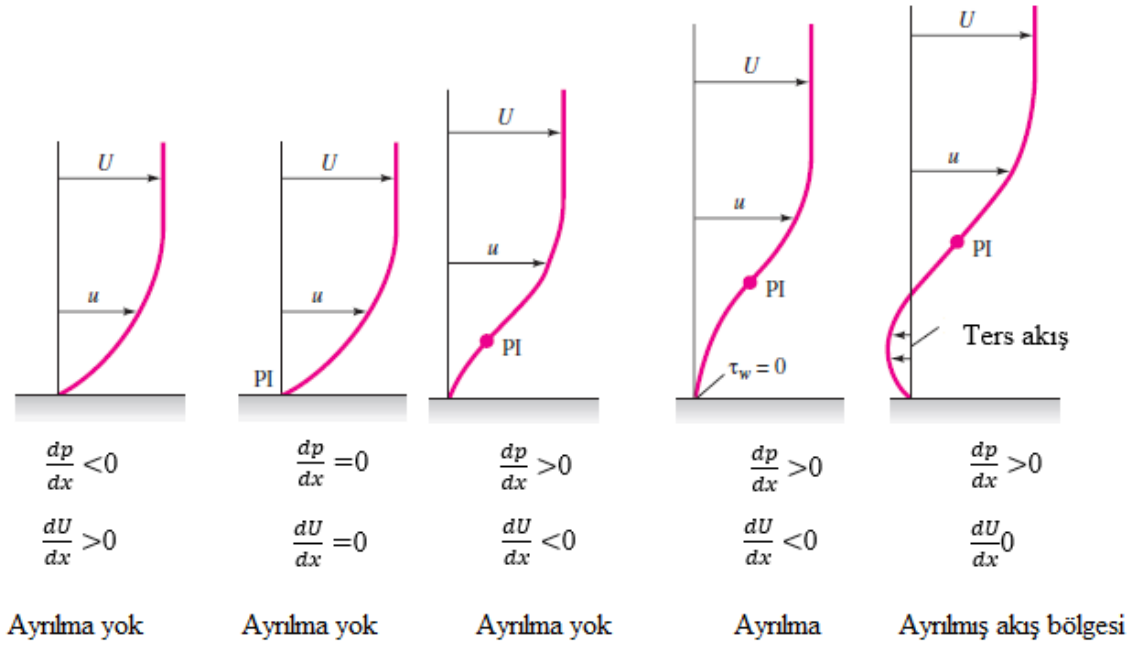
Kaldırma kuvveti ise cismin çevresindeki basınç dağılımı ve kayma kuvvetlerine bağlı olarak ortaya çıkar. Ayrıca akımın sınır tabakadan ayrılması ile oluşan girdap saçılımına bağlı olarak ek bir kaldırma kuvveti de dâhil olabilmektedir. Tüm bu etkilerden oluşan kaldırma kuvveti;

$$F_L = \frac{C_L}{2} A \rho D u^2 \quad (1.3)$$

olarak ifade edilir. Burada C_L kaldırma katsayısıdır.

1.3. Girdap Kopma Olayı

Küt cisimlerin akışa direnç göstermesi sonucu akışın belirli noktadan ayrılması ile girdap kopması, girdap saçılımı meydana gelmektedir. Küt cisim yüzeyine çarpan akışkan hızı başlangıçta sıfır olmakta ve bu durumda da basınç en yüksek değerini almaktadır. Cisim yüzeyinde hareket eden akışkandan dolayı ilk başta oluşan basınç gradyanının ($dp/dx < 0$) yerini, cidar yakınında sürtünme etkisiyle ters basınç gradyanı ($dp/dx > 0$) alır. Cidarda kayma gerilmesinin sıfır olması durumunda ayrılma gerçekleşir. Ayrılma noktasında yüzeye yakın akışkanın basınç gradyanını yenmek için yeterli enerjisi yoktur ve ileri hareket etmesi olanaksızdır. Arkadan gelen akışkan geri yöndeki akışa engel olduğu için de sınır tabakası ayrılması olayı gerçekleşir. Devamında negatif basınç değerleriyle ortaya çıkan ters akış; yüzeyden ayrılma olduğunun bir göstergesidir. Ayrılan akış cisim arkasında bir karışım bölgesinin oluşmasına neden olur. İfade edilen ayrılma durumu Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2. Cisim yüzeyinden ayrılmanın gerçekleşmesi olayı [1]

Akış içerisindeki cisim üzerinde oluşan sınır tabakası bir süre sonra cisim yüzeyinden ayrılır ve cisim arkasında bir iz bölgesi oluşmasına neden olur. Ayrılma; silindir gibi küt cisimlerde cisim geometrisi nedeniyle hızlı bir şekilde oluşur. Ancak aerodinamik yapıları kanat gibi cisimlerde akış yüzeye tutunmakta ve yüzey boyunca hareket etmekte olduğundan ayrılma daha geç ortaya çıkar. Bu nedenle küt cisimlerin arkasında oluşan iz bölgesi aerodinamik yapıları cisimlere göre daha geniştir. Bu iz bölgesinde bir karışım hareketi mevcuttur ve yüksek enerji kayıpları olmaktadır.

Küt cisim üzerinde gerçekleşen bu ayrılma olayı sonrasında negatif basınç etkisiyle akış cisim kenarından içeri doğru dönme eğilimi gösterir ve girdap formuna girmeye başlar. Bu olay cismin hem alt hem de üst köşesinden meydana gelir. Cismin her iki köşesi için de, akışa paralel bir kenarında sınır tabakası girdap formunu alırken; diğer kenarda bir süre sonra girdap formuna sahip olacak başka bir sınır tabakası oluşmaya başlar. Ayrılma sonrası girdaplar büyüyerek belirgin bir boyuta ulaşır ve enerjisini kaybedip serbest akışa karışana kadar model arkasında yol alırlar. Burada periyodik bir hareket söz konusudur ve bu bölgeye Karman girdap caddesi denilmektedir. Dairesel kesitli silindir arkasındaki periyodik hareket; Reynolds sayısının $10^2 < Re < 10^6$ aralığında boyutsuz frekansın yaklaşık 0,21 değerinde oluşur [1]. Strouhal sayısı olarak tanımlanan boyutsuz frekans;

$$St = \frac{f \times D}{u_{\infty}} \quad (1.4)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada f cisim yüzeyinden kopan girdap frekansını, D karakteristik uzunluğu ve u_{∞} serbest akış hızını göstermektedir.

1.4. Dairesel Silindir Etrafındaki Akımın Rejimi

Dairesel silindir etrafındaki akış boyutsuz Reynolds sayısına bağlıdır.

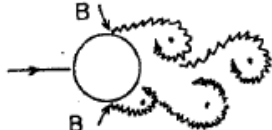
$$Re = \frac{u_0 D}{\nu} \quad (1.5)$$

Bu denklemde D silindir çapı, u_0 akım hızı ve ν akışkanın kinematik viskozite katsayısıdır. Reynolds sayısı arttıkça akım rejiminde değişime neden olur. Akım bazı karakteristik özelliklerinin Re sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 1.3'te verilmiştir [2].

Reynolds sayısının çok küçük değerleri için ayrılma meydana gelmez. Reynolds sayısının değeri 5 olduğunda ilk ayrılma gerçekleşir (Şekil 1.3.a).

Reynolds sayısının $5 < Re < 40$ olması durumunda silindirin iz bölgesinde bir çift girdap oluşur (Şekil 1.3.b).

Reynolds sayısının büyümesiyle silindir art izi bölgesinin stabilizesi bozulur, bu olaya girdap saçılımı denilmektedir. Reynolds sayısının $40 < Re < 200$ aralığında olması durumunda girdap sokağında akım laminar rejimdedir. Bu durumda girdap saçılımı iki boyutludur, yani silindirin düşey eksenine boyunca bir değişim yoktur [3] (Şekil 1.3.c).

	Akım Şekli	Akım Özelliği	Reynolds Sayısı
a		Ayrılma yok	$Re < 5$
b		Bir çift simetrik vorteks oluşur	$5 < Re < 40$
c		Vorteks sokağında akım (laminer)	$40 < Re < 200$
d		Art izi bölgesinde türbülanslı akıma geçiş başlar	$200 < Re < 300$
e		Art izi bölgesi tamamen türbülanslıdır. A: laminar sınır tabakasından ayrılma	$300 < Re < 3 \times 10^5$ Kritik altı rejim
f		A: laminar sınır tabakasından ayrılma B: Türbülanslı tabakadan ayrılma	$3 \times 10^5 < Re < 3,5 \times 10^5$ Kritik rejim
g		B: Türbülanslı sınır tabakasından ayrılma, sınır tabakası bazen laminar bazen türbülanslıdır	$3,5 \times 10^5 < Re < 1,5 \times 10^6$ Kritik üstü rejim
h		C: Sınır tabakası bir kenarda tamamen türbülanslıdır	$1,5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$ Kritik geçiş üstü rejim
i		C: Sınır tabakası her iki kenarda türbülanslıdır	$4 \times 10^6 < Re$ Kritik geçiş

Şekil 1.3. Silindir etrafındaki akımın karakteristik özellikleri [2]

Reynolds sayısının artması ile silindir art izi bölgesinde türbülanslı akım hâkim olmaya başlar. (Şekil 1.3.d)'de Reynolds sayısının $200 < Re < 400$ aralığında akım durumu geçiş rejiminden türbülanslı rejime doğru değişir [4]. Reynolds sayısının bu aralık değeri için küçük Reynolds sayılarında görülen iki boyutlu çevri kopması, türbülans etkisi ile üç boyutlu olmaktadır [3], [5].

$Re > 300$ durumunda art izi bölgesi tamamen türbülanslı olmaktadır. Reynolds sayısının $300 < Re < 3 \times 10^5$ gibi oldukça büyük bir değer aralığında silindir yüzeyindeki sınır tabakası içerisinde akım laminar olmaktadır. Bu durum literatürde kritik altı rejim olarak bilinmektedir (Şekil 1.3.e).

Reynolds sayısının daha da artması ile sınır tabakası içerisinde akım türbülanslı duruma geçmeye başlamaktadır. Bu geçiş önce sınır tabakasının ayrıldığı noktada meydana gelir; Reynolds sayısının artışı ile birlikte türbülansa geçiş bölgesi silindir memba yüzeyi boyunca durgunluk noktasına doğru hareket eder (Şekil 1.3.f, g, h, ı).

Reynolds sayısının $3 \times 10^5 < Re < 3,5 \times 10^5$ gibi oldukça dar olduğu bir aralıkta ayrılma noktasındaki sınır tabakasında akım türbülanslıdır (Şekil 1.3.f). Sınır tabakasındaki türbülans önce sadece silindirin tek tarafında meydana gelir, bu durumda diğer tarafta laminar sınır tabakası akımı mevcuttur. Rejimin bu durumu kritik akım rejimi veya düşük geçiş bölgesi olarak literatüre geçmiştir. Bu akım alanındaki asimetriklik durumu, ortalama kaldırma kuvvetinin sıfırdan farklı olmasına neden olur. Türbülansın bir kenardan diğer kenara değişmesi durumu ile kaldırma kuvveti de yön değiştirir [6].

Reynolds sayısının $3,5 \times 10^5 < Re < 1,5 \times 10^6$ olduğu aralıkta da akım literatüre kritik üstü rejim olarak geçmiştir. Bu aralıkta silindirin her iki tarafında da sınır tabakasındaki ayrılma bölgelerinde akım türbülanslıdır. Buna rağmen silindir üzerindeki sınır tabakası tam olarak türbülanslı hale geçmemiştir. Bu geçiş durma noktası ile ayrılma noktası arasındadır (Şekil 1.3.g).

Reynolds sayısının $1,5 \times 10^6$ olması durumunda artık sınır tabakası tamamen türbülanslı olmaktadır. Ancak silindirin kenarlarından birinde sınır tabakası laminardır.

$1,5 \times 10^6 < Re < 4,5 \times 10^6$ aralığında sınır tabakası silindirin bir tarafında tamamen türbülanslı; bir tarafında ise bazen laminar bazen de türbülanslıdır. Bu akım rejimi literatürde kritik geçiş üstü akım rejimi olarak bilinir (Şekil 1.3.h).

$Re > 4,5 \times 10^6$ olduğu durumlarda silindir yüzeyindeki sınır tabakası her yerde türbülanslı olur. Bu akım rejimi kritik geçiş akımı olarak adlandırılmıştır (Şekil 1.3.ı).

1.5. Literatür Araştırması

Silindir gibi küt bir cisim etrafındaki akışın incelenmesi uzun yıllardır araştırmacılar için bir çalışma konusu olmuştur. Son yıllarda sayısal çözümlemelerdeki gelişmelerle birlikte, silindir üzerine yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar oldukça fazla olmasına rağmen akım karakteristikleri tam olarak çözülememiştir.

Literatürde yer verilen çalışmalarda silindir etrafındaki akım, silindir etrafındaki akıma başlık etkisi ve silindirlerin arka arkaya yerleştirilmesi durumlarında akım karakteristikleri üzerinde durulmuştur.

Taneda dairesel silindir arkasındaki girdap kopmasını deneysel olarak su tankında çalışmıştır. Yapmış olduğu çalışmalarda akım görüntüleme yöntemini kullanmıştır. Reynolds 170 değerinde yapmış olduğu çalışmada katı duvar yakınında durgun su içindeki silindir sabit hızla çekildiğinden sınır tabakası etkisi olmamıştır. Farklı boşluk oranları için yapmış olduğu deneylerde $G/D = 0,1$ değerinde silindirin sadece üst kısmında girdap kopması oluşurken boşluk oranının $G/D = 0,6$ olduğu durumda silindirin her iki yüzeyinde de girdap kopması gözlemlendiğini bildirmiştir [7].

Bearman ve Zdravkovich düz bir plaka üzerindeki silindir etrafındaki akımı Reynolds $2,5 \times 10^4$ ve $4,5 \times 10^4$ değerleri için deneysel olarak incelemişlerdir. Sıcak tel anemometresi kullanarak rüzgâr tüneline yaptıkları deneylerde farklı boşluk oranları için girdap kopmalarını incelemişlerdir. $G/D > 0,3$ durumunda silindir mansabında düzenli girdap kopması oluştuğunu boşluk oranının artmasının girdap kopmasında bir etkisinin olmadığını; $G/D < 0,3$ durumunda girdap kopmalarının bastırıldığını belirtmişlerdir. Deneylerde aldıkları basınç ölçüm sonuçlarına göre küçük boşluk oranlarında silindir membaındaki durma noktasının duvara doğru kaydığını bildirmişlerdir. Bu durumun

silindiri duvardan uzaklaştırma eğilimine iten bir kaldırma kuvveti neticesinde olduğunu belirtmişlerdir [8].

Buresti ve Lanciotti rüzgâr tüneline sıcak tel anemometresi kullanarak Reynolds $8,6 \times 10^4$ – $3,0 \times 10^5$ aralığında pürüzsüz dairesel silindir ve pürüzlü dairesel silindir olarak iki farklı silindir etrafındaki akım özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı boşluk oranlarının etkisini inceledikleri çalışmalarında pürüzsüz silindir için girdap kopmasının olduğu en küçük boşluk oranının 0,3-0,4 D olduğunu, pürüzlü silindir için bu değerin 0,2-0,3 D olduğunu belirtmişlerdir. Girdap kopmasının olduğu boşluk oranını kritik boşluk oranı olarak adlandırdıkları çalışmalarında, boşluk oranının kritik değerden büyük olması durumunda Strouhal sayısının boşluk oranından bağımsız olduğunu bildirmişlerdir [9].

Zdravkovich rüzgâr tüneline akım görüntüleme yöntemi kullanarak Reynolds = 25000 değeri için deneysel bir çalışma yapmıştır. Yapmış olduğu çalışmada silindirin tabana oturduğu durumda yani $G/D = 0$ durumunda silindir arkasında girdap kopması olmadığını belirtmiştir. Türbülanslı sınır tabakası olması durumunda $G/D = 0,2$, laminar sınır tabakası olması durumunda $G/D > 0,4$ için düzenli girdap kopması gözlenmemiştir. Düzenli, girdap kopmalarının oluşması ile silindir membaındaki ayrılma bölgesinin silindir ile duvar arasında oluşan kuvvetli boşluk akımı neticesinde kaybolduğunu bildirmiştir [10].

Grass ve arkadaşları $\delta/D = 0,28, 2,6, 6,0$ sınır tabakası kalınlıklarında ve Reynolds 1735 ve 3570 değerlerinde silindir etrafındaki akımı incelemişlerdir. Strouhal sayısını inceledikleri çalışmalarında G/D 'nin St 'ye etkisinin sınır tabakası kalınlığından bağımsız olduğunu ve $G/D < 2,0$ olması durumunda St 'de kademeli bir artış olduğunu bildirmişlerdir. $G/D < 0,3$ durumunda girdap kopması oluşmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca silindir memba ve mansabında oluşan ayrılma bölgelerinin de yalnızca $\delta/D = 0,28$ değerinde görüldüğünü ve kalın sınır tabakalarında bu bölgelerin oluşmadığını bildirmişlerdir [11].

Taniguchi ve Miyakoshi silindir etrafındaki akıma sınır tabakasının etkisini bulmak için farklı boşluk oranlarında silindire gelen kaldırma ve sürüklenme kuvvetini inceleyerek deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında girdap kopmalarının bastırıldığı

minimum boşluk oranının sınır tabakası kalınlığı artması ile doğru orantılı arttığını bildirmişlerdir [12].

Sumer ve Fredsoe silindirin tabana yakın olması durumunda girdap kopmasının bastırıldığını, silindir duvara yaklaştıkça ön durma noktasının aşağı doğru kaydığını, $G/D = 1,0$ durumunda silindir etrafındaki basınç dağılımı simetrik durumdayken boşluk oranı azaldıkça simetrinin bozulduğunu belirtmişlerdir. Sürüklenme katsayısı olan C_D 'nin boşluk oranının belirli bir değere kadar artması ile doğru orantılı arttığını daha sonra sabit hale geldiğini bildirmişlerdir. $G/D = 1$ değerine kadar silindire kaldırma kuvveti C_L etki edeceğini bu kuvvetin boşluk oranı azaldıkça aşırı bir şekilde arttığını ve bu durumda durma noktasını aşağı çektiğini belirtmişlerdir [13].

Lei ve arkadaşları düz bir plaka üzerindeki silindire gelen kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini ve girdap kopmalarını farklı sınır tabakası kalınlıkları için Reynolds $1,3 \times 10^4 - 1,45 \times 10^4$ aralığında deneysel olarak incelemişlerdir. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin boşluk oranından etkilendiklerini belirttikleri çalışmalarında küçük boşluk oranları için sürüklenme katsayısının ince sınır tabakasında kalın sınır tabakasına göre daha büyük değerler aldığını bildirmişlerdir. Silindirin sınır tabakası dışında olması durumunda boşluk oranının sürüklenme katsayısını etkilemediğini, silindirin kısmi ya da tam olarak sınır tabakası içinde olması durumunda ise sınır tabaka kalınlığı ile sürüklenme katsayısının doğru orantılı arttığını bildirmişlerdir. $G/D = 0,2 - 0,3$ değerlerinde girdap kopmalarının bastırıldığını $G/D > 2$ olması durumunda ise taban etkisinin ihmal edilebileceğini belirtmişlerdir [14].

Choi ve Lee düz bir plaka üzerine yerleştirdikleri eliptik silindir etrafındaki akımı Reynolds 14000 değeri için deneysel olarak incelemişlerdir. Eliptik silindiri, membaında tabana yerleştirilen bir kablo vasıtasıyla kalınlığı artırılmış türbülanslı bir sınır tabakası içerisine yerleştirmişlerdir. Çalışmada karşılaştırma yapabilmek için çapı eliptik silindirin düşey yüksekliği ile aynı olan bir dairesel silindir kullanarak deneyleri tekrarlamışlardır. G/D farklı boşluk oranları için gerçekleştirdikleri deneyde boşluk oranı arttıkça C_D sürüklenme katsayısının arttığını, C_L kaldırma katsayısının ise azaldığını belirtmişlerdir. Bütün boşluk oranları için eliptik silindirde C_D katsayısının dairesel silindirin yarısı olduğunu bulmuşlardır. Basınç dağılımını inceledikleri deneyde boşluk oran arttıkça basıncın düştüğünü; $0,2 < G/D < 0,5$ aralığında basıncın ani düşüş gösterdiğini $G/D > 0,5$

durumunda ise basıncın yavaş düştüğünü belirtmişlerdir. Eliptik silindir için $G/D > 0,4$ durumunda kuyrukta düzenli girdap kopmaları oluşsa dahi $G/D = 1$ ve $G/D = 0,5$ durumlarında silindir mansabında oluşan ayrılma bölgesi yapılarının birbirinden farklı olduklarını gözlemlemişlerdir [15].

Nishimura ve Taniike dairesel bir silindir etrafındaki anlık basınç dağılımlarını Reynolds 61000 değeri için deneysel olarak incelemişlerdir. Rüzgâr tüneline gerçekleştirildikleri deneyler sonucunda ayrılma açısının zamansal ortalamasının 76 derece olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları basınç ölçümleri sonucunda; sürüklenme kuvveti, kaldırma kuvveti, durma açısı ve ayrılma açılarının salınım periyotlarından elde edilen Strouhal sayısının 0,202 olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca ayrılma ve durma noktalarının senkronize bir salınım yaptıklarını bildirmişlerdir [16].

Price, Summer ve arkadaşları düz bir duvar yakınındaki silindir etrafındaki akımı PIV akım görüntüleme yöntemi ve sıcak tel anemometresi kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Reynolds 1200 ve 1400 değerlerinde PIV yöntemini $1380 \leq Re \leq 4960$ aralığında ise kızgın tel anemometresi yöntemini kullanmışlardır. $0 \leq G/D \leq 0,125$ boşluk oranı için akımın bastırılmış olduğunu girdap kopması gözlenmediğini belirtmişlerdir. $G/D = 0,125$ ve $0,375$ değerleri için silindirin membaında oluşan ayrılma bölgesinin boyutunun küçüldüğünü G/D oranının artması ile bölgenin küçülmeye devam ettiğini, silindir üzerinde periyodik bir girdap kopması oluştuğunu silindir alt bölgesinde ise girdap kopması oluşmadığını bildirmişlerdir. $0,5 < G/D < 0,75$ aralığında silindirden ayrılan tabakaların tamamı kıvrılarak girdap kopması oluşturmuştur. $G/D > 1$ durumu için silindir membaında sınır tabakası ayrılması oluşmamış ve katı sınır etkisinin bu boşluk oranlarında bulunmadığını bildirmişlerdir [17].

Cokgör düzenli akım durumunda kanal tabanı üzerinde ve kanal tabanına yarı gömülü haldeki silindirler için Reynolds 8000 ve 15000 değerleri için deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Silindir etrafındaki basınç dağılımını basınç transformatörü ile ölçmüştür. C_L kaldırma katsayı ve C_D sürüklenme katsayılarını araştırdığı çalışmasında e/D gömülme oranı azaldıkça C_L değerinin arttığını, C_D değerinin azaldığını bildirmiştir [18].

Hatipoğlu ve Avcı düzenli akım durumunda kanal tabanı üzerinde veya yarı gömülü halde bulunan silindir akımını sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyleri akım görüntüleme metodu kullanarak yapmışlardır. Reynolds 13000 ve 26000 aralığında

ayrılma bölgesi uzunluklarını incelemişlerdir. Elde ettikleri nümerik ve deneysel sonuçlara göre gömülme arttıkça memba ve mansap bölgelerinde ayrılma bölgesi uzunluğunun azalma gösterdiğini belirtmişlerdir. $G/D = 0$ için yani silindirin kanala tabanı üzerinde olması durumunda ayrılma bölgesi uzunluğu membada D , mansapta $6,7 D$ olurken; yarı gömülü durumda membada ayrılma bölgesi gözlenmezken mansapta ayrılma bölgesi uzunluğunun $2,8 D$ olduğunu bildirmişlerdir [19].

Zdravkovich $G/D = 0$ durumunda girdap kopmaları oluşmasa da silindir üst kısmından kopan kayma tabakalarının kuyrukta geniş girdaplar oluşturabildiğini belirtmiştir. Küçük boşluk oranlarında membadaki ayrılma bölgesi uzunluğunun çok küçük kaldığını ve silindir membada girdap kopması meydana gelmediğini; büyük boşluk oranlarında ise kuyrukta düzenli girdap kopmaları oluştuğunu bildirmiştir. G/D oranı arttıkça akımın simetrik bir görünüme sahip olmaya başladığını $G/D = 2$ durumunda ise akımın tam simetrik olduğunu belirtmiştir [20].

Wu ve arkadaşları dairesel bir silindir etrafındaki akımı Reynolds sayısının 280'den küçük olduğu durumlar için deneysel olarak incelemişlerdir. Sınır tabakası ayrılma açısını araştırdıkları çalışmalarında soap-film akım görüntüleme yöntemini kullanmışlardır. Ayrılma açıları ile ilgili yapılan çalışmalarda açı için verilen farklı ve geniş değer aralıklarının deney yöntemleri ve ayrılma açısının düzensiz bir yapıda olmasından kaynaklandığını belirtmişler ve yaptıkları nümerik çözüm sonuçlarına göre $7 \leq Re \leq 200$ aralığında ayrılma açılarının zamansal ortalaması için $\theta_a = 95,88 + 264,76Re^{-1/2} - 619,01Re^{-1} + 1042,4Re^{-3/2}$ ifadesini önermişlerdir. Önerdikleri bu ifade için kareler ortalaması karekökü hata payının 0,0004 olduğunu ve elde ettikleri deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçların uyum içerisinde olduğunu bildirmişlerdir [21].

Liang ve Cheng yaptıkları nümerik çalışmalarında silindir etrafındaki akımı $G/D = 0,37$ durumu için incelemişlerdir. Hesaplama ağı, sınır koşullarının farklı türbülans modelleri üzerindeki etkilerini literatürdeki veriler ile karşılaştırmışlardır. Smagorinsky SGS, standart $k-\varepsilon$ ve $k-\omega$ türbülans modellerini karşılaştırmış SGS modelinin silindir etrafındaki akım için uygun sonuçlar vermediğini bildirmişlerdir. Standart $k-\varepsilon$ ve $k-\omega$ türbülans modellerinin silindir etrafındaki akımı tahmin etmede başarılı sonuçlar verdiğini, ağ yapısının ise girdap kopması için oldukça önemli olduğunu belirtmişlerdir [22].

Özgören kare ve dairesel silindir akımını $550 \leq Re \leq 3400$ aralığında DPIV dijital parçacık görüntüleme yöntemini kullanarak incelemiştir. Çevrintinin hız, çap ve Reynolds sayısı ile ilişkisini incelediği çalışmada kare silindir için ayrılma noktasının silindir membaında sabit olduğunu, Strouhal sayısının ise dairesel silindirde kare silindirden daha büyük değerler aldığını belirtmiştir [23].

Kırkgöz ve arkadaşları Reynolds 9500 değeri ve $G/D = 0,3$ boşluk oranı için dairesel silindir akışını *ANSYS FLOTTRAN* programını kullanarak modellemişlerdir. Üç farklı türbülans yöntemi kullandıkları çalışmalarında, $k-\omega$ ve SST $k-\omega$ modellerinin sık ağ yapısı gerektirdiğini ve silindir etrafındaki akım için hız alanının tahmin etmede başarılı olduğunu belirtmişlerdir [24].

Aköz ve arkadaşları düz bir yüzeyde yarı gömülü halde bulunan silindir etrafındaki akımı nümerik olarak modellemişlerdir. $1000 \leq Re \leq 7000$ aralığında yaptıkları çalışmalarında 6 farklı türbülans modeli kullanmışlardır. $G/D = 0,0 - 0,25 - 0,5$ olmak üzere gömülü olmayan ve iki farklı gömülme oranında inceleme yapmışlardır. SST türbülans modelinin diğer türbülans modellerine göre daha başarılı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Gömülme oranı arttıkça C_D ve C_L katsayılarının azaldığını bildirmişlerdir [25].

Hulsbergen yaptığı küçük ölçekli laboratuvar testleri sonucunda boru hattı üzerine yerleştirilen başlığın yerel erozyon oluşumunu tetiklediğini ve oyulma hassasiyetini büyük ölçüde arttırdığını tespit etmiştir [26].

Hulsbergen ve Bijker hareketli bir taban üzerine yerleştirilen $0,25D$ yüksekliğindeki bir başlığa sahip boru hattı için deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda başlığın, yerel akım özellikleri, sediment taşınımı ve basınç dağılımı üzerinde önemli değişikliklere sebep olduğunu, öz gömülme işlemi başlıksız bir silindire nazaran 10 kat daha hızlandırdığını ve tabana oturan boru hattı için sürüklenme kuvvetini artırırken, kaldırma kuvvetini azalttığını bildirmişlerdir [27].

Chiew akıntı ve dalga etkisi altındaki bir boru hattında başlığın yerel oyulmalara olan etkisini deneysel olarak incelemiştir. Başlığın oyulma derinliği ve genişliğini artırıcı etkiye sahip olduğunu bildirmiştir. Oyulma miktar ve genişliğinde meydana gelen bu artışa blokaj etkisinin sebep olabileceğini belirtmiştir [28].

Bijker yaptığı deneysel çalışma sonucu başlığın boru hattı etrafındaki akım ve basınç alanında sebep olduğu değışikliklerin askıdaki boru hattının gömülmesini hızlandırdığını bildirmiştir [29].

Chew ve Cheng başlığın hız profiline ve kayma gerilmesine olan etkisini nümerik olarak araştırmışlardır. Reynolds 1000 ve Reynolds 2000 değerleri için $G/D = 0,5- 0,2$ değerleri için yaptıkları çalışmalarında 0,125D, 0,25D, 0,37D olarak üç farklı başlık yüksekliği kullanmışlardır. Başlık kullanımının silindir ve taban arasındaki boşluğa doğru akımı arttırdığını dolayısıyla tabandaki kayma gerilmesinin başlık kullanımı ile arttığını belirtmişlerdir. Başlığın ilave blokaj etkisi yaparak boru hattı yakınında akımı arttırdığını ifade etmişlerdir [30].

Cheng ve Chew yaptıkları çalışmada Reynolds 1000 ve Reynolds 2000 değeri için başlıklı ve başlıksız dairesel silindir etrafındaki akımı nümerik olarak incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmaya göre başlığın silindir ve taban arasındaki akımı arttırdığını, tabandaki kayma gerilmelerinin arttığını bildirmişlerdir. Başlık kullanımı durumunda C_D katsayısının arttığını, silindir membaında basınç artarken, mansapta basıncın azaldığını, girdap kopmaları arttığından kuyruk bölgesinde oyulmaların arttığını bildirmişlerdir [31].

Öner, Reynolds 840 ve 4150 değerlerinde yapmış olduğu nümerik çalışmasında $G/D = 0,2$ boşluk oranında başlığın akıma etkisini incelemiştir. 0,2 D olarak belirlediği başlık yüksekliğindeki çalışmasında; başlığın hız vektörlerini tabana yönlendirdiğini bildirmiştir. Basınç yoğunluğu silindir memba kısmında artış gösterirken mansap kısmında C_D değıştiği için azaldığını bildirmiştir [32].

Öner, Reynolds 840, 1500, 4150 ve 9500 değerleri için başlık etkisini incelemiştir. Yapmış olduğu çalışmada $G/D = 0,1, 0,2, 0,3$ durumlarında akımı incelemiştir. Elde ettiği başlıklı silindir sonuçlarını başlıksız boru hattı üzerinde yapmış olduğu çalışmalar ile karşılaştırmıştır. Başlık eklenmesinin borunun hem mansabında hem de membaında ayrılma bölgesinin uzamasına neden olduğunu, ayrıca başlığın hidrodinamik kuvvetlere olan etkisi nedeniyle durma noktasının açısının artmasına neden olduğunu bildirmiştir [33].

Zhu ve arkadaşları başlık kullanımının, başlık yüksekliğinin ve G/D oranının oyulma ve akım karakteristiği üzerine etkisini incelemişlerdir. Basınç, aerodinamik kuvvetler ve hızı

incelediği çalışmalarında Reynolds 0 - 50760 aralığında çalışmışlardır. Buldukları sonuçlara göre başlık yüksekliğinin atmasının ve boşluk oranının azalmasının öz gömülme olayını hızlandırdığını belirtmişlerdir. Başlık kullanımının silindir membaında negatif basınç alanı oluşturduğunu ve başlık yüksekliği arttıkça negatif basınç değerinin arttığını mansapta ise ikinci negatif basınç alanı oluşturduğunu bildirmişlerdir. Aerodinamik kuvvetler için yaptıkları incelemede başlık yüksekliği artışının sürüklenme katsayısı C_D ve kaldırma katsayısı C_L değerlerinin artmasına neden olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca hem başlık kullanımında hem de boşluk oranının artması durumunda akım hızının arttığını belirtmişlerdir [34].

Abbasi ve arkadaşları FLOW-3D yazılımı kullanarak nümerik olarak başlıklı ve başlıksız silindirin farklı boşluk oranlarında açılı olarak yerleştirilmesi durumunu incelemişlerdir. Çalışmalarında başlık kullanımının oyulma derinliğini ve basıncı arttırdığını boşluk oranının artmasının ise oyulma derinliğini azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca silindirin yatay ile yaptığı açı arttıkça oyulmanın azaldığını bildirmişlerdir [35].

Öner, Reynolds 9500 değerinde başlık kullanımının boru hattına olan etkisini nümerik olarak incelemiştir. Elde ettiği sonuçları literatürdeki deneysel veriler ile karşılaştırmıştır. SST, standart $k-\epsilon$ ve standart $k-\omega$ türbülans modellerini kullandığı çalışmasında standart $k-\omega$ modelinin hem başlıklı hem de başlıksız durumda daha başarılı sonuç verdiğini bildirmiştir. $G/D = 0,1, 0,2, 0,3$ değerlerinde boşluk oranlarının etkisini de araştırdığı çalışmasında C_L katsayısının boşluk oranı arttıkça azaldığının ve başlık kullanımı ile negatif değerler aldığını bu durumun öz gömülme olayını sağladığını belirtmiştir [36].

Meneghini ve arkadaşları yan yana ve üst üste konumlanmış dairesel silindirlerde akım etkileşimini nümerik olarak incelemişlerdir. 100, 200 gibi düşük Reynolds sayılarında yaptıkları çalışmalarını ANSYS FLUENT programı ile çözümlenmişlerdir. Silindirler arasındaki mesafeyi L olarak belirttikleri yan yana gerçekleştirdikleri çalışmada $L < 3D$ olması durumunda negatif C_D katsayısının gözlemlendiğini $L > 3D$ olması durumunda C_D katsayısının pozitif olduğunun belirtmişlerdir. Ayrıca $L < 3D$ durumunda girdap kopması sadece mambadaki silindirde oluşurken $L > 3D$ durumunda her iki silindirde de girdap kopmaları ayrı ayrı gözlemlendiğini bildirmişlerdir [37].

Arie ve arkadaşları aynı çaptaki iki silindirin yan yana farklı aralıklarla yerleştirilmesi durumunda hidrodinamik kuvvet katsayılarını incelemişlerdir. İki silindir arasındaki

mesafe 7D olması durumunda kaldırma ve sürüklenme katsayılarının mansap bölgesinde membaya göre daha büyük değerler aldığını belirtmişlerdir. Mesafe $L > 10D$ olması durumunda silindirlerin birbirini etkilemediğini bildirmişlerdir. Mansap kısmında kalan silindir için L mesafesi sürüklenme katsayısını önemli oranda etkilediğini belirtmişlerdir [38].

Kitagawa ve Ohta Reynolds 2200 değeri için yapmış oldukları nümerik çalışmada yan yana konumlanmış borular arasındaki mesafe etkisini incelemiş ve sonuçlarını literatürde buldukları deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır. $L/D < 3,25$ durumunda girdap kopması yalnızca mansapta bulunan silindirde gözlenmiş $L/D > 3,25$ durumunda ise hem memba hem de mansapta bulunan silindirler için girdap kopması gözlemlenmiştir. $L/D > 3,25$ durumunda kaldırma ve sürüklenme katsayılarının deneysel verilerden daha büyük değerler olarak elde etmişlerdir [39].

Zhao ve arkadaşları kararlı akım durumunda yan yana bulunan dairesel kesitli silindir akımı için silindirler arası mesafenin etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. $G/D=0,5-5$ aralığında yaptıkları çalışmalarında $G/D = 0,5, 1, 1,5$ durumlarında deney başladıktan 12 saat sonrasında girdap kopması gözlenmediğini belirtmişlerdir. $G/D = 5$ olması durumunda ise her iki silindirin birbirinden bağımsız tek silindir gibi akım özelliği gösterdiğini bildirmişlerdir [40].

Prsic ve arkadaşları Reynolds 1360 durumunda yan yana iki silindir arası mesafe oranı L/D ve silindirlerin taban ile olan boşluk oranı G/D için OpenFOAM programını kullanarak nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. $L/D = 2$ ve 5 için yaptıkları çalışmada $L/D = 5$ durumu için silindirlerin bağımsız birer silindir gibi davrandıklarını $L/D = 2$ durumunda ise birbirlerinden etkilendiklerini bildirmişlerdir. [41]

Dan ve arkadaşları yan yana bulunan silindirler arası mesafe oranı ve akım hızının oyulmaya olan etkisini incelemişlerdir. $G/D = 1-3$ aralığında yaptıkları çalışmalarında $G/D \leq 2$ durumunda memba kısmındaki silindir için oyulma mansap kısmında bulunan silindirden fazla olmuştur. $G/D > 2$ durumunda ise memba kısmında kalan silindir altındaki oyulmanın mansap kısmında kalan silindir altındaki oyulmadan küçük olduğunu bildirmişlerdir [42].

Schewe ve arkadaşları yan yana bulunan iki silindir etrafındaki akımı Reynolds sayısının 1×10^6 ve 1×10^7 gibi yüksek değerleri için iki farklı boşluk oranında incelemiştir. Aynı çaptaki iki silindir için yaptıkları çalışmada mansap silindirindeki sürüklenme katsayısının her iki boşluk oranında yani, $G/D = 2,8$ ve 4 olması durumunda tekli silindire benzer sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Mansap silindirindeki sürüklenme katsayısının ise Reynolds sayısına bağlı olarak farklı karakter sergilediğini, Strouhal sayısının da $G/D = 4$ olması durumunda tekli silindire benzer sonuç verirken; $G/D = 2,8$ olması durumunda düşük değerler aldığını bildirmişlerdir [43].

Damroudi ve arkadaşları yaptıkları deneysel çalışmada, başlıklı silindir etrafındaki akımı başlığa açı vererek ve başlığı hem dikdörtgensel hem de dairesel olarak yerleştirerek oyulmaya olan etkisini incelemiştir. Dairesel başlık yerleştirilmesi ve açı verilmesi durumunda, açılar 135° , 180° ve 225° olmaları durumunda oyulmanın başlıksız silindire göre % 80 - 90 oranında arttığını belirtmişlerdir [44].

Enjin ve arkadaşları dairesel başlıklı silindir etrafındaki akımda oyulmayı hem sayısal hem de deneysel olarak incelemiştir. Yaptıkları çalışmada başlık olması durumunda oyulmada Reynolds sayısının, başlık boyutunun, başlık ve silindir arasındaki mesafenin etkisinin oldukça önemli olduğunu ve Reynolds sayısının artması durumunda oyulmanın da arttığını bildirmişlerdir. Silindir ve başlık arasındaki mesafe ise arttıkça oyulmanın azaldığını gözlemlemişlerdir [45].

Zhu ve arkadaşları başlıklı silindirin oyulmaya olan etkisini hem gerçek bir proje üzerinde hem de deneysel olarak incelemiştir. Çin Hangzhou Koyu'nda yapmış oldukları gözlemsel sonuçları 12 yıllık bir süreç olarak almış ve başlığın oyulmaya olan etkisini araştırmışlardır. Buna bağlı olarak 2005-2016 yılları arasında başlık kullanımının oyulmayı %40 mertebesinde 90 mertebesine çıkardığını hem gerçek değerlerle hem de deneysel olarak belirtmişlerdir [46].

Jabari ve arkadaşları tek silindir için deneysel olarak yaptıkları çalışmada başlığın silindir üzerinde değil de altına yerleştirilmesi durumunda oyulma üzerine olan etkisini incelemiştir. Farklı başlık yüksekliği ve farklı boru çaplarında yaptıkları çalışmalarda elde ettikleri sonuçları başlık içermeyen durum ile karşılaştırmış ve başlık kullanımının oyulmayı %49-%55 oranında artırdığını bildirmişlerdir [47].

1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında, taban etkisinin olmadığı durumda silindir etrafındaki akım, silindire başlık eklenmesi durumunda akım özellikleri, silindirlerin arka arkaya farklı boşluk oranlarında yerleştirilmesi durumları deneysel olarak incelenmiştir. Tek bir Reynolds sayısı için yapılan çalışmalarda öncelikle başlıksız silindir etrafındaki akım incelenmiştir. Silindir üzerine 0,2D yükseklikte başlık eklenmesi durumu ile akıma başlık etkisi incelenmiştir. Bu çalışmalardan sonra; arka arkaya yerleştirilen silindirler arasındaki boşluk oranı $L/D = 2, 4$ ve 7 olacak şekilde üç farklı oranda yalnızca başlıksız silindirler, yalnızca başlıklı silindirler, memba ve mansapta başlıklı ve başlıksız silindirler olması durumlarında akım etkileri incelenmiştir.

Yapılan çalışmalarda akım duman ile görüntüleme tekniği ile görüntülenmiştir.

Silindir etrafındaki akışa başlık etkisini ve bu etkinin hız değişimlerine, girdap kopmalarına olan etkisini incelemek için sıcak tel anemometresi kullanılmıştır. Bu sayede silindirlerin 0,5D kadar arkasında hat boyunca hız profili çıkarılmış, girdap kopma frekansı ve frekansa bağlı olarak da Strouhal sayısı değişimleri incelenmiştir.

Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin ve katsayılarının bulunması için aerodinamik kuvvet ölçüm deneyi yapılmıştır.

Silindir etrafındaki basıncın belirlenebilmesi için silindir etrafında açılan delikler yardımı ile basınç ölçüm deneyi gerçekleştirilmiştir ve basınç profilleri çıkarılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) paket programı olan *ANSYS FLUENT* ile sayısal olarak hesaplanmış ve elde edilen bulgular karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar ile hesaplama ağ yoğunluğu, farklı türbülans modellerinin sayısal bulgular üzerindeki etkileri incelenmiştir.

BÖLÜM 2

YÖNTEM VE MATERYAL

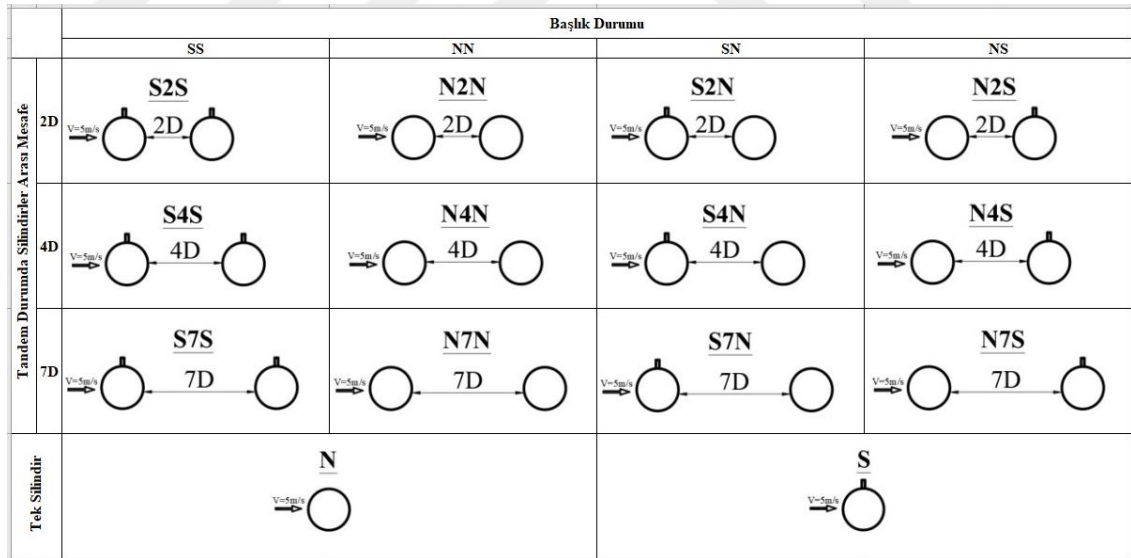
2.1. Deneysel Yöntem ve Materyal

Bu tez çalışmasında silindir etrafındaki akış deneysel olarak incelenmiştir. Kullanılan silindir çapı 5 cm olarak belirlenmiş ve silindirin başlıklı ve başlıksız olması durumlarına bakılarak başlık etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneylerde taban etkisinin olmaması için G/D boşluk oranı 5 olarak belirlenmiş ve deneyler bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Başlıklı ve başlıksız tek silindir etrafındaki akım ile birlikte silindirlerin arka arkaya yerleştirilmesi durumları da incelenmiştir.

Arka arkaya yerleştirilme durumlarında silindirler arası mesafe $L = 2D, 4D$ ve $7D$ olarak belirlenmiş ve deneyler bu üç farklı konfigürasyon ile gerçekleştirilmiştir. Her bir boşluk oranı için; memba ve mansap silindirlerinin başlıksız olması durumu, memba ve mansap silindirlerinin başlıklı olması durumu, memba silindiri başlıklı mansap silindiri başlıksız olması durumu ve memba silindiri başlıksız mansap silindiri başlıklı olması durumları incelenmiştir. Bu incelemeler daha kolay ve daha anlaşılır bahsedebilmek adına kodlanmış ve bu durumlar aşağıda tablo olarak verilmiştir.

Tablo 2.1. Silindirlerin durumlarına göre isimlendirme kodlaması

Silindirlerin Durumları	Silindirler arası mesafe	Durum Kısaltması
Başlıksız tek silindir	-	N
Başlıklı tek silindir	-	S
Memba ve mansap silindiri başlıksız	2D	N2N
Memba ve mansap silindiri başlıksız	4D	N4N
Memba ve mansap silindiri başlıksız	7D	N7N
Memba ve mansap silindiri başlıklı	2D	S2S
Memba ve mansap silindiri başlıklı	4D	S4S
Memba ve mansap silindiri başlıklı	7D	S7S
Memba silindiri başlıksız mansap silindiri başlıklı	2D	N2S
Memba silindiri başlıksız mansap silindiri başlıklı	4D	N4S
Memba silindiri başlıksız mansap silindiri başlıklı	7D	N7S
Memba silindiri başlıklı mansap silindiri başlıksız	2D	S2N
Memba silindiri başlıklı mansap silindiri başlıksız	4D	S4N
Memba silindiri başlıklı mansap silindiri başlıksız	7D	S7N



Şekil 2.1. Deney yapılan durumlar ve isimlendirme

Tez çalışmasında literatürde daha önce çalışmamış olan SS, SN ve NS durumları deneysel ve sayısal olarak incelenmiş ve NN, S ve N durumları için yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar literatürde bulunan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda 5,00 m/s hız ve bu hıza karşılık gelen Reynolds sayısı $Re=14000$ değeri kullanılmıştır.

2.1.1. Deney Kanalı ve Özellikleri

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneyler Erciyes Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bünyesinde bulunan Rüzgâr Mühendisliği ve Aerodinamik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar bünyesinde bulunan rüzgâr tüneli; emmeli tipte ve test odası uzunluğu 2000 mm, test odası boyutları 500 mm x 500 mm'dir. Tünel test odası şeffaf pleksiglass malzeme kullanılarak üretilmiştir. Tünelde havanın emilimini sağlamak için kullanılan fan 15 kW gücünde ve 1500 devir/dakika hızında çalışmaktadır. Rüzgar tüneli çalışma hızı maksimum 40 m/s minimum 5 m/s ve test odasında akışın türbülans yoğunluğu %1'in altındadır [48].



Şekil 2.2. Deneylerde kullanılan rüzgâr tüneli

2.1.2. Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmaların hemen hemen hepsi çeşitli nedenlerden dolayı hata içerir. Bu hatalar sistematik hatalar olabileceği gibi, dikkatsizlik ve tecrübesizlikten de kaynaklanabilir. Elektronik ölçme aletlerinde oluşan salınım, elektrik geriliminde oluşan değişim, deney yapılan ortamın sıcaklığında meydana gelebilecek değişimler de deneysel hataya neden olabilecek nedenlerdir. Deneysel sonuçların geçerliliğini tespit etmek için bir hata analizi yapılması gereklidir. Hata analizi deneysel ölçümlerden elde edilen parametrelere ait hata oranlarının belirlenmesi ile yapılır. Bu hata oranı denklem (2.1) kullanılarak hesaplanır ve yüzde olarak elde edilir.

$$u_R = \left[\left(\frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \left(\frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

Örnek olarak C_p basınç katsayısı için belirsizlik hesabı yapmak istememiz durumunda; bu katsayı basınç farkı, yoğunluk ve hıza bağlıdır. Denklem (2.1)' de bu değerler yerine yazılacak olursa;

$$u_{c_p} = \left[\left(\frac{\Delta p}{c_p} \frac{\partial c_p}{\partial \Delta p} u_{\Delta p} \right)^2 + \left(\frac{\rho}{c_p} \frac{\partial c_p}{\partial \rho} u_{\rho} \right)^2 + \left(\frac{U}{c_p} \frac{\partial c_p}{\partial U} u_U \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

Denklemini elde edilir. Gerekli işlemler yapıldığında;

$$u_{c_p} = \left[\left(\frac{1}{0.5\rho U^2} u_{\Delta p} \right)^2 + \left(-\frac{\Delta p}{0.5\rho^2 U^2} u_{\rho} \right)^2 + \left(-2\frac{\Delta p}{0.5\rho U^3} u_U \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

Denklemini elde edilir.

Katsayılar yerine konup sadeleştirmeler yapıldıktan sonra aşağıdaki (2.4) numaralı denklem elde edilir. Hata payları bu denklemde yerine yazılarak C_p için belirsizlik yüzde olarak elde edilir.

$$u_{c_p} = \left[(u_{\Delta p})^2 + (-u_{\rho})^2 + (-2u_U)^2 \right]^{1/2} \quad (2.4)$$

Basınç katsayısı C_p için yapılan hesapların aynısı kaldırma katsayısı C_L , sürüklenme katsayısı C_D için de yapılarak tabloda verilmiştir.

Tablo 2.2. Farklı katsayılarla ait belirsizlikler

Reynolds Sayısı	% U_{C_L}	% U_{C_D}	% U_{C_p}
14000	6,9	8,7	7,2

2.1.3. Blokaj Etkisi

Blokaj oranı; akışın dik temas ettiği rüzgâr tüneli test odasının alanının, deney numunesinin akışa dik yüzeyde görünen alanına oranıdır. Deneylerin gerçekleştirildiği rüzgâr tüneli test odasının alanı $0,25 \text{ m}^2$ 'dir. Kullanmış olduğumuz silindir numunelerde ise alan başlıklı ve başlıksız olmasına göre $0,018 \text{ m}^2$ ve $0,015 \text{ m}^2$ olmaktadır. Blokaj oranı gerçekleştirilen deney şartlarında %7 ve %6 değerlerini almaktadır. Blokaj oranı %10

değerinin altında olduğunda blokaj düzeltilmesi yapılmasına gerek olmadığından blokaj düzeltilmesi yapılmamıştır [49].

2.1.4. Deney Numuneleri ve Özellikleri

Tez çalışmasında 5cm çapında silindir kullanılmıştır. Başlıklı numunelerde başlık et kalınlığı 0,1D başlık yüksekliği ise 0,2D olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılacak numuneler PVC boru kullanılarak üretilmiştir. Rüzgâr tüneline yapılan deneylerde kullanılacak numunelerin uç girdaplarından etkilenmemesi için şeffaf pleksiglass malzeme ile yan kısımlarına plakalar yapıştırılmıştır.



Şekil 2.3. Üretilmiş olan başlıklı ve başlıksız silindir numuneler

Basınç deneyi de yapılacak olan numunelerde basınç okumalarını yapabilmek için üzerlerine belirli açılarla delikler açılmıştır. Bırakılan bu deliklere 0,55 mm çapında kelebek serum iğneleri yerleştirilerek basınç okumalarının alınması sağlanmıştır.



Şekil 2.4. Üretilen numunelerde bulunan basınç okuma delikleri

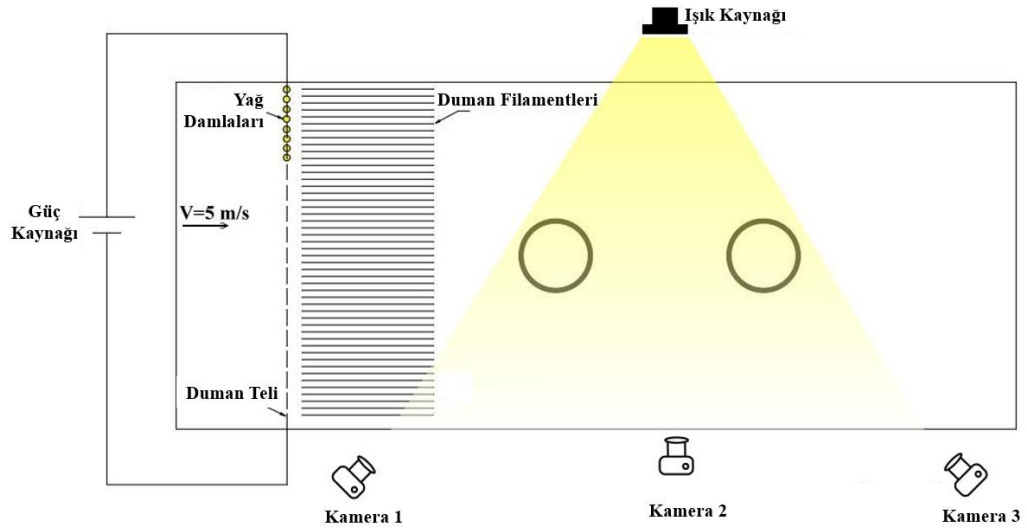
2.1.5. Duman Teli ile Akım Görselleştirme Deneyi

Rüzgâr tünellerinde cisimler etrafında akışı görselleştirmek için kullanılan çeşitli yöntemler mevcuttur. Duman teli ile akış görselleştirme kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Tez çalışması kapsamında silindirler etrafındaki akışı görselleştirmek için bu yöntem kullanılmıştır. Duman teli ile akış görselleştirmede en uygun görüntünün alınabilmesi yani akış desenlerinin görüntülenebilmesi için karanlık bir ortam oluşturulması gerekmektedir. Bu amaçla kanal içi tamamen siyah karton ile kaplanmış ve siyah perdeler kullanılarak test odasının tamamen karanlık olması sağlanmıştır. Görsel olarak iyi görüntü elde etmede diğer bir önemli faktör ise aydınlatmadır. Bu amaçla kanalın üst kısmında şerit halinde bırakılan bir boşluk üstten iki spot lambası ile ve alt kısımdan bırakılan şerit halinde boşluk bir adet spot lambası ile aydınlatılmıştır. Oluşturulan karanlık oda içerisine 3 adet kamera farklı açılarla yerleştirilmiş ve akış tam karşıdan, memba kısmından ve mansap kısmından video olarak kaydedilmiştir.



Şekil 2.5. Duman teli deneyi için oluşturulmuş karanlık ortam ve bölgesel aydınlatma

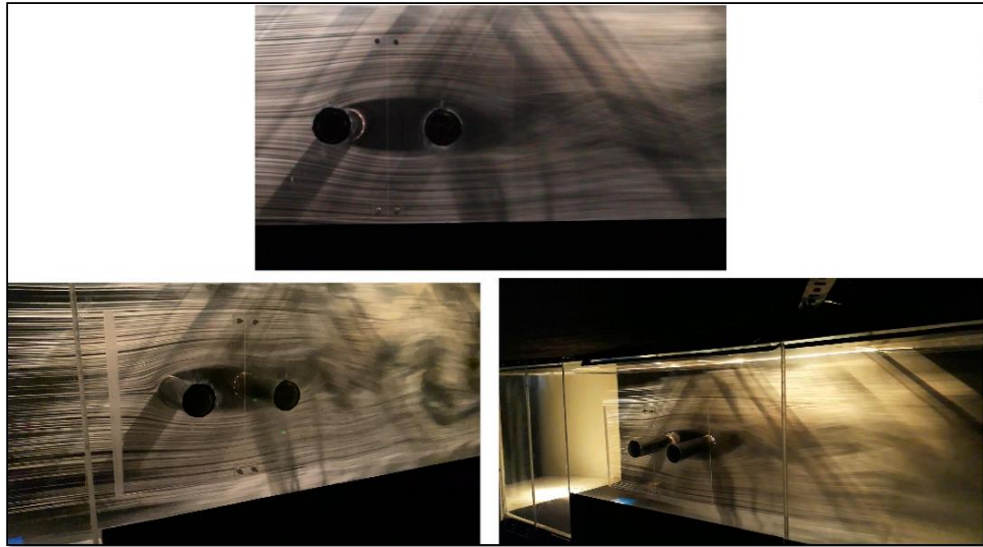
Duman teli ile akış görselleştirmede bakır bir direnç teli silindir membâna silindirlerin orta kesitine denk gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu tel üzerine yukarıdan şırınga yardımı ile yağ damlatılmış ve bu yağ tel üzerine homojen olarak dağılana kadar beklenilmiştir. Yağ tel üzerine homojen olarak dağıldığında tele bağlı elektrik dirençli ısıtıcı ile tele direnç verilmiştir. Verilen bu direnç ile tel üzerinde bulunan yağ damlacıkları yanarak duman oluşturmuş ve oluşan bu duman silindirler etrafından geçerken akışın şeklini almıştır. Oluşan duman desenleri yerleştirilmiş olan kameralar ile kayıt altına alınmıştır. Duman desenlerinin görüntülenmesinde karanlık ortam ve ışık açısı kadar önemli bir nokta da tele verilecek olan direnç değerinin ayarlanmasıdır. Düşük direnç olması durumunda duman desenleri oluşmazken yüksek direnç verilmesi durumu telin kopmasına sebep olduğundan optimum direnç anahtar yardımı ile ayarlanmaktadır. Direncin verilme süresi yine görüntüyü etkileyen faktörlerden bir tanesidir. Deneylerde tele yaklaşık olarak 0,5 sn direnç verilmiştir.



Şekil 2.6. Duman teli deneyi şematik gösterimi

2.1.5.1. Duman Teli Deneyi ile Elde Edilen Görüntüler

Tez kapsamında yapılan duman deneyleri video olarak 3 farklı açıdan kaydedilmiştir. Kameralardan bir tanesi tam karşıdan görüntü alacak şekilde yerleştirilmiş olup diğer iki kamera memba ve mansap kısımlarını görüntüleyecek şekilde yerleştirilmiştir. Kaydedilen bu video görüntüleri Adobe Premiere Pro 2020 programı kullanılarak düzenlenmiş ve 3 açı aynı anda tek video olarak oluşturulmuştur. Yine düzenlenen bu videolar fotoğraf karesi olarak kaydedilmiş ve sonuçlar bu şekilde verilmiştir.

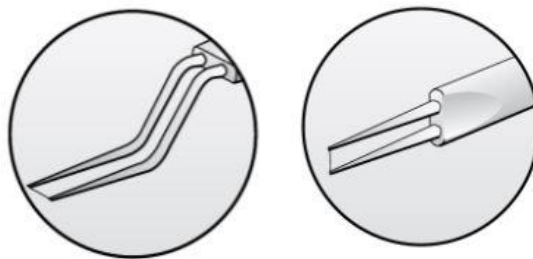


Şekil 2.7. Başlıksız İki Silindir $L=2D$ (N2N) durumunda 3 farklı açıdan alınmış görüntü

2.1.6. Sıcak Tel Anemometresi ile Hız Ölçümü (Hotwire) Deneyi

Silindir etrafındaki akışa başlık etkisini ve bu etkinin hız değişimlerine, girdap kopmalarına olan etkisini incelemek için sıcak tel anemometresi travers sistemi ile birlikte kullanılmıştır. Sıcak tel anemometresi sisteminde temel çalışma prensibi hız ölçüm probunun ucunda bulunan tele elektrik akımı verilerek telin ısıtılması ve hava akışı ile daha düşük sıcaklığın telde zorlanmış taşınımına neden olmasıdır. Sıcaklığı düşen prob ucundaki telde sıcaklık probun bağlı olduğu sistem ile sabit tutulmaya çalışılır. Sistemde bulunan wheatstone köprüsü aracılığı ile prob üzerinden geçen akım gerilim sinyaline çevrilir ve bilgisayarda bağlı bulunan analog dijital çeviriciye gönderilir. Bu çevirici gönderilen gerilim sinyallerini ikili sayı sistemine çevirir. Bilgisayar yazılımı yardımıyla yapılan kalibrasyon probdan gelen bu sinyalleri hız değerlerine dönüştürür [50].

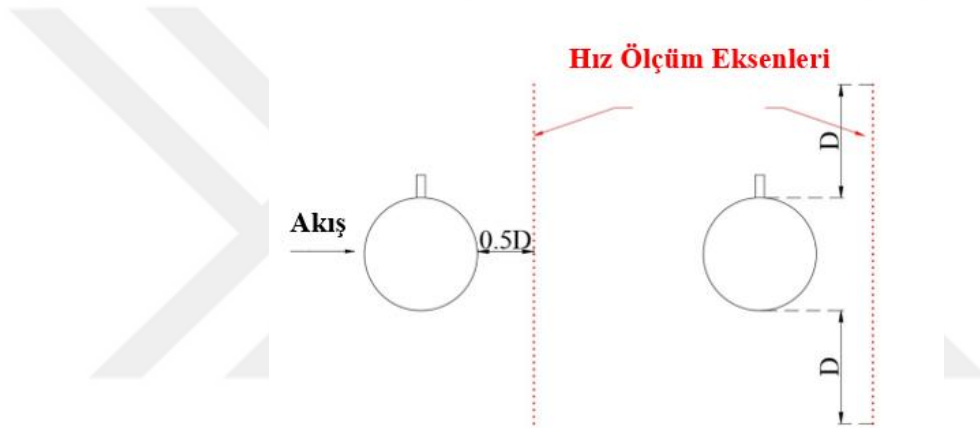
Sıcak tel anemometresi deneylerinde kısa sürede çok fazla veri ölçülebildiği için girdap kopma frekansları bu sistem ile ölçülebilmektedir. Sıcak tel anemometresi deneylerinde kullanılan problar Dantec Dynamics firmasından temin edilen problelerdir. Probleler özelliklerine göre tek eksenli, çift eksenli olabilmektedir. Bu tez kapsamında yapılan deneylerde iki adet tek eksenli prob kullanılmıştır. Deneylerde iki silindir arasındaki hız ölçümlerini almak için 55P15 probu, mansap silindiri art izinde hız ölçümü almak için 55P16 probu ve kanal girişinde T29 referans hız probu kullanılmıştır. Kullanılan 55P15 probu özellik olarak sınır tabaka probu olarak geçmektedir. Bu prob özelliği ile iki silindir arası yakın olduğu durumlarda da rahatlıkla ölçüm alınabilmektedir.



Şekil 2.8. Sıcak Tel Anemometresi Probleri

Sıcak tel anemometresi deneyleri yapılırken silindirler arasında ve mansap silindirinin art izi kısmında olmak üzere iki farklı yerde hız ölçümü aynı anda yapılmıştır. Deneylerde probun y doğrultusundaki hareketi Dantec Dynamics firmasına ait olan travers sistemi kullanılarak yapılmıştır. Travers sistemi x ve y doğrultusunda hareketi sağlayabilmektedir. Tez kapsamında yapılan deneylerde x doğrultusunda hareketi gerektirecek bir durum olmadığından iki probu üzerinde bulunduracak ve iki probunda aynı anda hareketini sağlayacak bir sistem oluşturularak travers sisteme yerleştirilmiş ve böylece iki prob aynı

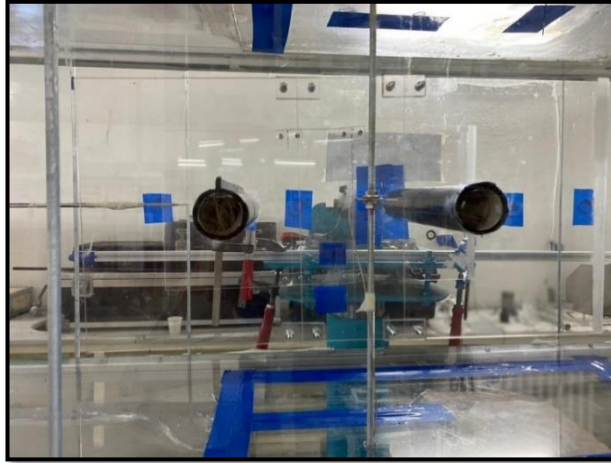
anda y ekseninde aynı miktarda hareket etmiş ve aynı anda ölçüm almıştır. Ölçüm alınırken her iki prob da silindirlerden x ekseninde $0,5D$ mesafede art izinde olacak şekilde yerleştirilmiştir. Düşey ölçümler ise y ekseninde silindirlerin $1D$ mesafe yukarısından başlayarak $1D$ altına kadar her 1 mm de bir ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm alınan her noktada saniyede 1000 veri alma özelliği ile 5 saniyelik ölçüm yapılmıştır. Böylece ölçüm alınan her noktadan 5000 veri elde edilmiştir. Ölçümlerde anlık hız ve ortalama hız değerleri sıcak tel anemometresinin CTA yazılımı elde edilmiştir. Böylece hem arka arkaya iki silindir olması durumlarında hem de tekli silindir olması durumunda yatay olarak ortalama hız diyagramı elde edilebilmiştir.



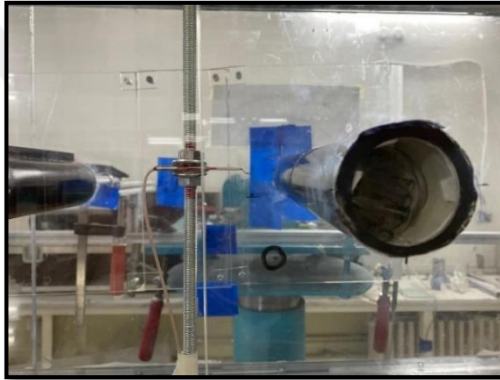
Şekil 2.9. Sıcak tel anemometresi deneyi şematik gösterimi



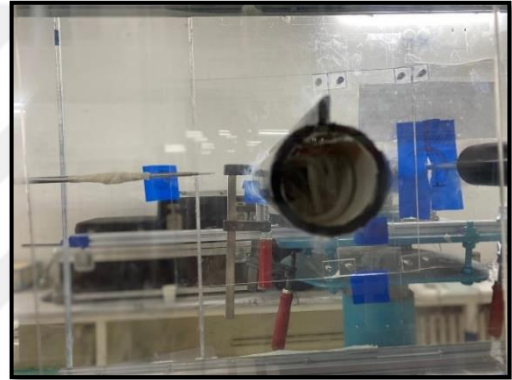
Şekil 2.10. Kullanılan travers sistemi ve sistem üzerine yerleştirilen ikili ölçüm sistemi



a) İki probun genel görünümü



b) İki silindir arası prob yerleşimi

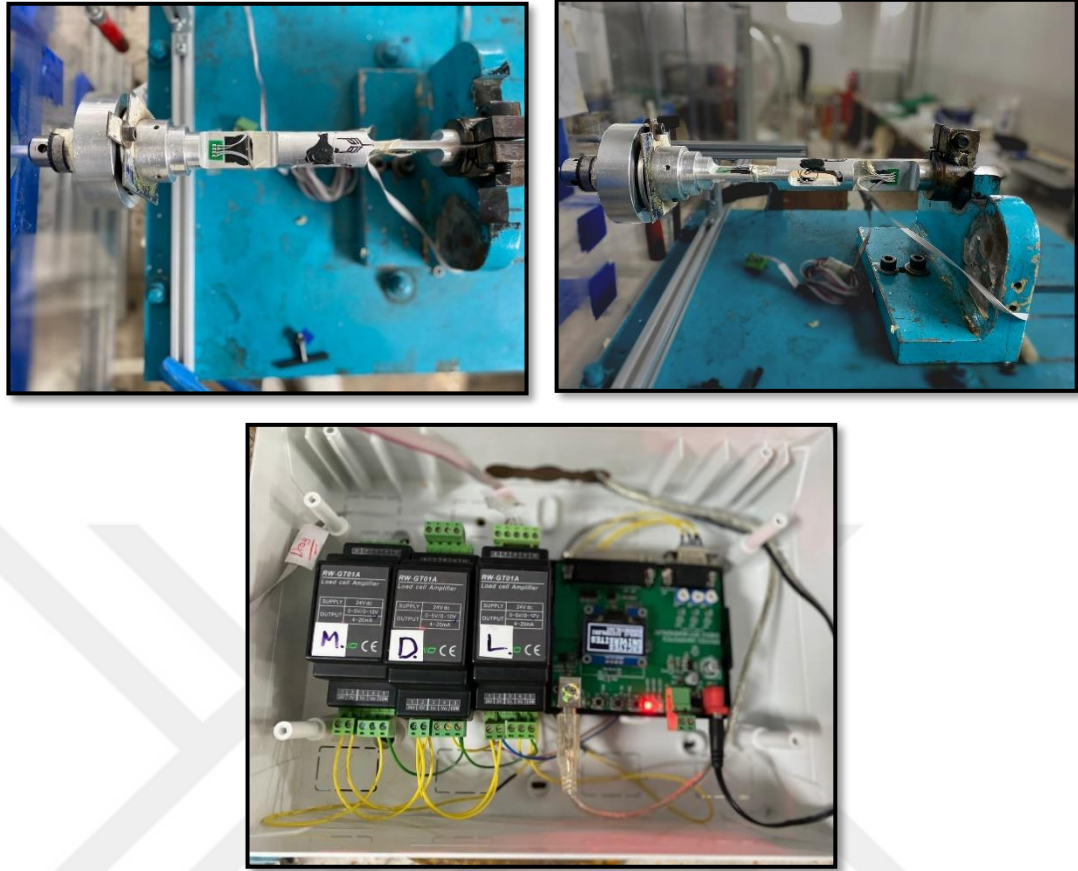


c) Mansap silindiri art izi prob yerleşimi

Şekil 2.11. Sıcak tel anemometresi problelerinin deney sistemine yerleştirilmesi

2.1.7. Aerodinamik Kuvvet Ölçüm Deneyi

Silindirlere etki eden kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin ve katsayılarının bulunması için aerodinamik kuvvet ölçüm deneyi yapılmıştır. Bu deneyde Şekil 2.24’de görülen Erciyes Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliğinin kendi geliştirmiş olduğu kaldırma (lift), sürüklenme (drag), moment ölçümü yapabilen üç bileşenli bir sistem kullanılmıştır. Deneylerde moment ölçümü yapılmamış olup kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin ölçümü gerçekleştirilmiştir.

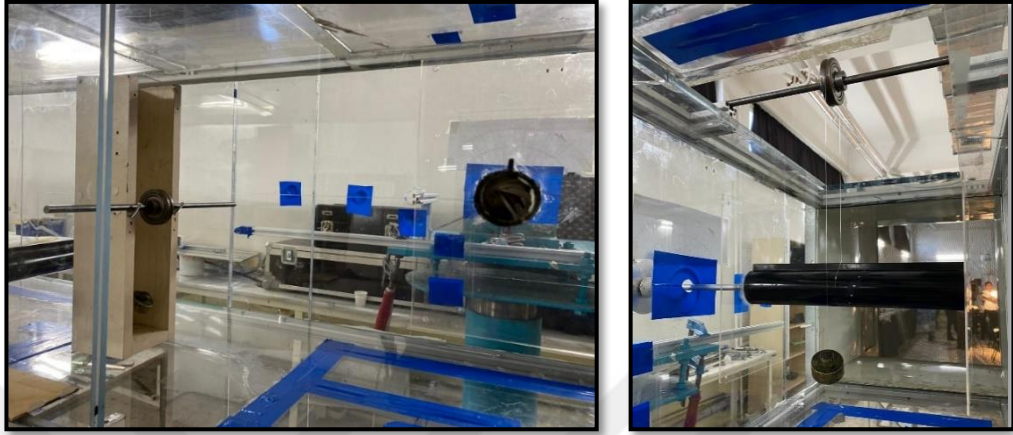


Şekil 2.12. Üç bileşenli kuvvet ölçüm sistemi

Kuvvet ölçümü yapılırken ikili silindir olması durumunda hem memba hem de mansap silindirlerinde kuvvet ölçümleri alınmıştır. Sistemsel olarak aynı anda iki silindirde kuvvet ölçümü almak mümkün olmadığından öncelikle memba silindirinde ölçüm alınmış ardından silindirler farklı şekilde bağlanarak mansap silindirinde ölçüm yapılmıştır. Her bir silindir değiştirilmesi durumunda sistem yeniden kalibre edilmiştir. Kalibre işleminde öncelikle sisteme bağlanan silindir üzerine hiçbir kuvvet etki etmediği durumda ölçüm alınmış ardından sisteme sürüklenme ve kaldırma için ayrı ayrı 200 gr ağırlık bağlanarak sistemin 0-200 gram arasında enterpolasyon yapması sağlanmıştır. Deneylerde saniyede 1000 veri alma özelliği ile 60 saniye boyunca ölçüm alınmıştır. 60000 veri sistem yazılımı aracılığı ile kuvvete dönüştürülmüş ve bu şekilde kayıt yapılmıştır. Bu verilerin ortalamaları alınarak aerodinamik kuvvetler olan sürüklenme kuvveti ve kaldırma kuvvetleri belirlenmiştir. Bulunan bu kuvvetler daha sonra denklem (2.5) ve denklem (2.6) kullanılarak aerodinamik katsayılar elde edilmiştir.

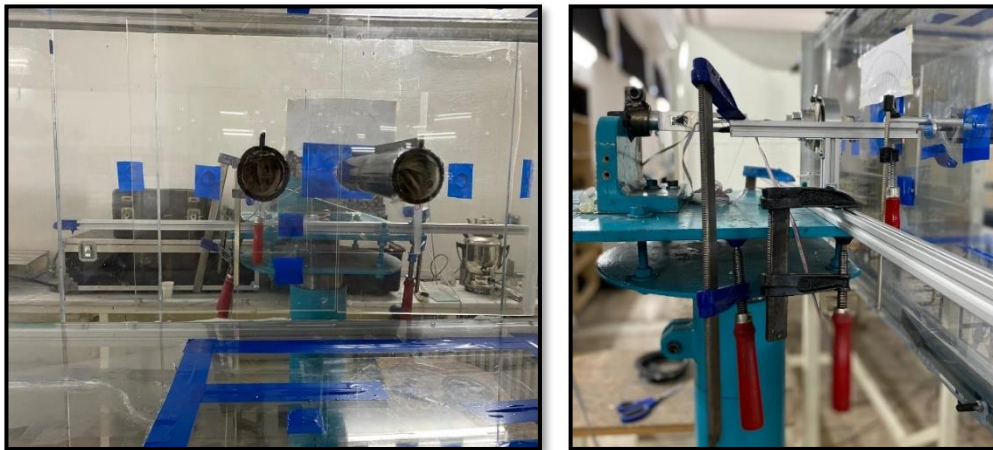
$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2.5)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2.6)$$



Şekil 2.13. Sürüklenme kuvveti ve kaldırma kuvveti için kalibrasyon düzeneği

Kuvvet ölçümü deneyi gerçekleştirilirken ikili silindir durumunda kuvvet ölçümüne bağlanan silindirin diğer silindirle temas etmemesi için silindirler bağlantı elemanları ile birbirine bağlanmamıştır. Kuvvet ölçümü alınan silindir kuvvet ölçüm sistemine bağlanırken, diğer silindir arka kısma yapılan bir düzeneğe işkenceler vasıtası ile sabitlenmiştir. Silindirler aralarındaki 2D, 4D ve 7D mesafeyi koruyacak şekilde ancak birbirine temas etmeden ölçüm alınmıştır.



Şekil 2.14. Silindirlerin kuvvet ölçüm sistemine yerleştirilmesi

2.1.8. Basınç Ölçüm Deneyi

Silindir etrafındaki basıncın belirlenebilmesi için silindir etrafında açılan delikler yardımı ile basınç ölçüm deneyi gerçekleştirilmiştir. Basınç ölçümleri manometre, pitot tüpü ve 24 adet basınç algılayıcı ile gerçekleştirilmiştir. Tek durumda bir silindir üzerinde 12 nokta bulunmaktadır. Silindirlerin arka arkaya yerleştirilmesi durumlarında ise toplamda 24 adet nokta bulunmaktadır ve bu noktalardan ölçüm alınmıştır. Basınç ölçümü yapılmadan önce basınç algılayıcıların kalibrasyonu yapılmıştır. Rüzgâr tünelinin hız ayarlaması yapılırken manometre, pitot tüpü ve (2.7) numaralı denklemde verilen dinamik basınç denklemi kullanılmıştır.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 \quad (2.7)$$

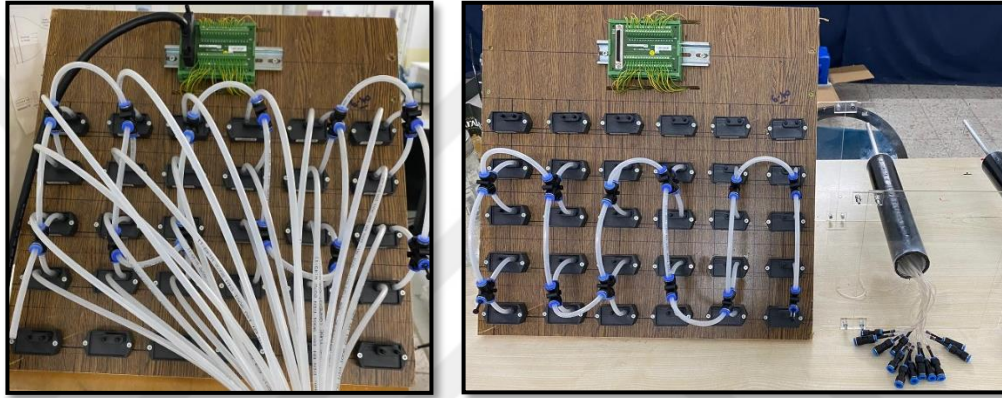
Basınç ölçümü gerçekleştirilirken her bir delikten çıkan borular basınç algılayıcılarına; hava sızdırmazlık özelliği olan pnömatik valfler ile bağlanmıştır. Kanal içinde yerleştirilmiş olan pitot tüpünün toplam basınç borusu basınç algılayıcılarının bulunduğu toplam basınç deliğine paralel olarak bağlanmış, statik basınç borusu ise boşta bırakılmıştır. Ölçülen değerler bilgisayar programı vasıtası ile okunmuş ve kaydedilmiştir. Ölçümlerin ortalamayı tam olarak yansıtmaları için saniyede 1000 veri alınarak 150 saniye ölçüm yapılmıştır. Bu durumda her bir deney durumunda her bir basınç noktası için 150000 veri kaydedilmiştir. Elde edilen değerlerin ortalamaları alınarak boyutsuz basınç katsayısı (2.8) numaralı denklem ile hesaplanmıştır.

$$C_p = \frac{P - P_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2} \quad (2.8)$$

Basınç katsayısı ile silindir etrafındaki kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri bulunabileceği gibi durma noktası da bulunabilmektedir. Ölçümler yapılırken tekli ve başlıksız silindir durumu için silindirin simetrik özelliğinden faydalanılmış, silindir saat yönünde ve saat yönünün tersi yönünde çevrilerek ölçüm noktası 60° a çıkarılmıştır. Böylece literatürle doğrulama sağlanmış ve başlıksız tek silindir için basınç dağılımı deneysel olarak elde edilmiştir.



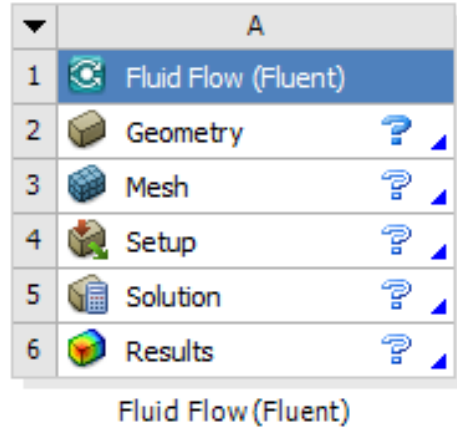
Şekil 2.15. Basınç ölçüm deney düzeneği



Şekil 2.16. Basınç ölçümünde kullanılan basınç algılayıcı ve pnömatrik valf sistemi

2.2. Sayısal Yöntem

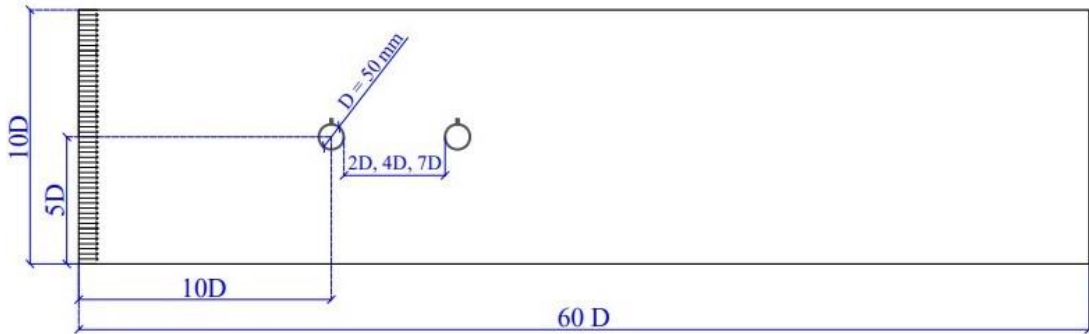
Bu bölümde silindir etrafındaki akış ile ilgili sayısal çalışmalar sunulmuştur. Sayısal çalışmalarda hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) paket programı olan *ANSYS FLUENT* yazılımı kullanılarak silindir etrafındaki akış modellenmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) akışkanlar mekaniği problemlerinde detaylı hesaplamaların yapılabildiği, akış alanı gibi detayların gösterilebildiği bilgisayar tabanlı bir mühendislik yöntemidir. *FLUENT*, *ANSYS* programında akışkanlar dinamiği ile ilgili olan ve sonlu hacimler yöntemine göre analiz yapan bir çözücüdür. *ANSYS* ile yapılan analizleri üç aşamaya ayırmak mümkündür. İlk aşamada sınır geometrisi belirlendikten sonra çözüm ağı oluşturulur. Daha sonra çözümler gerçekleştirilir. Son aşamada ise sonuçlar elde edilerek istenilen şekilde çıktısı alınabilir. Bu aşamaları süreç öncesi, süreç ve işlem sonrası olarak adlandırmak mümkündür [51]. *FLUENT* programına ait genel ara yüz Şekil 2.17 de verilmiştir.



Şekil 2.17. FLUENT programı ara yüzü

2.2.1. Geometri

Sayısal analiz çalışmaları gerçekleştirilirken ilk adım olarak geometri oluşturulmuştur. Analiz geometrisi oluşturulurken deneysel koşullar göz önüne alınarak benzer şekilde oluşturulmaya dikkat edilmiştir. Silindir çapı (D) deneysel çalışmalarda 5 cm olarak belirlendiğinden sayısal analizde de aynı çap kullanılmış; memba ve mansapta bırakılacak mesafeler ve kanal yüksekliği silindir çapı cinsinden belirlenmiştir. Şekil 2.18 de oluşturulan geometrinin özellikleri verilmiştir.



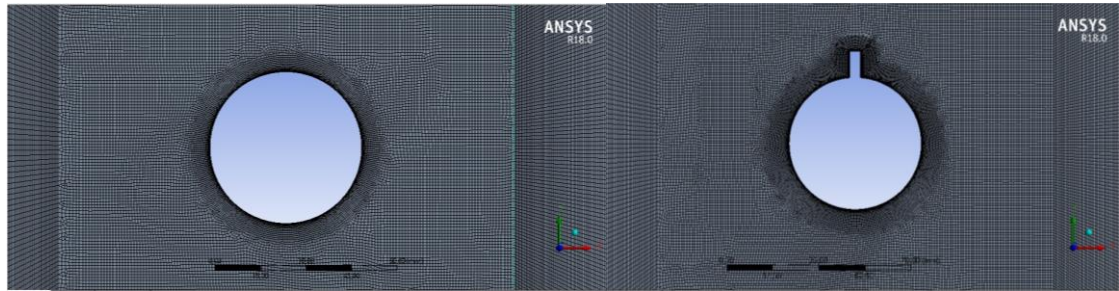
Şekil 2.18. Sayısal analiz kanal geometrisi

Çalışmada taban etkisi incelenmediğinden silindirler tabandan etkilenmeyecek şekilde 5D kadar yukarıda yerleştirilmiştir. Deneysel şartları sağlamak amacıyla kanal yüksekliği 10D olarak belirlenmiştir. Bu durumda silindirler taban ve tavan etkisinde kalmamaktadır. Silindirlerin membaında silindir merkezinden itibaren 10D mesafe bırakılmıştır. Gerçekleştirilen önceki çalışmalarda kanal girişi ile silindir merkezi arasında 8D mesafe olması durumunda yanal sınırların silindir etrafındaki akıma etkisinin olmadığı belirlendiğinden bu çalışmada 10D mesafe kullanılmıştır [52]. Kanalın toplam uzunluğu 60D olarak belirlenmiştir. Silindirlerin art izinde meydana gelen girdap

kopmalarının oluşumunu tam olarak incelemek amacıyla kanal uzunluğu yüksek tutulmuştur. Mansap silindirinin kuyruğunda kalan mesafe silindirler arasındaki mesafeye göre değişkenlik göstermiştir. Bu nedenle Şekil 2.18’ de yalnızca kanalın toplam uzunluğu ve silindir membainin uzunluğu gösterilmiştir.

2.2.2. Çözüm Ağı

Çözüm ağı oluşturma sayısal analizlerde en önemli aşamalardan bir tanesidir. Çözüm ağını oluşturma analiz sonucunun başarılı veya başarısız olmasını doğrudan etkileyen sayısal bir işlemdir. Çözüm ağı yoğunluğunun probleme uygun oluşturulması çözümün doğruluğunu ve çözüm süresini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca çözüm ağı kalitesinin de sayısal analizin yakınsaması, kararlılığı ve analizin doğruluğu üzerinde etkisi vardır [53]. Bütün bu durumlar göz önüne alındığında doğru çözüm ağını oluşturmak sayısal çözümde oldukça önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında çözüm ağı her bir geometri için farklı farklı oluşturulmuştur. Silindirin tek olması durumunda oluşturulan çözüm ağı şekil 2.19 a ve b durumlarında verilmiştir. Silindirde başlık olması durumunda silindir geometrisi değiştiği için başlıksız durumda oluşturulan ağ yapısı geometriye uygun formda oluşturulmuştur.



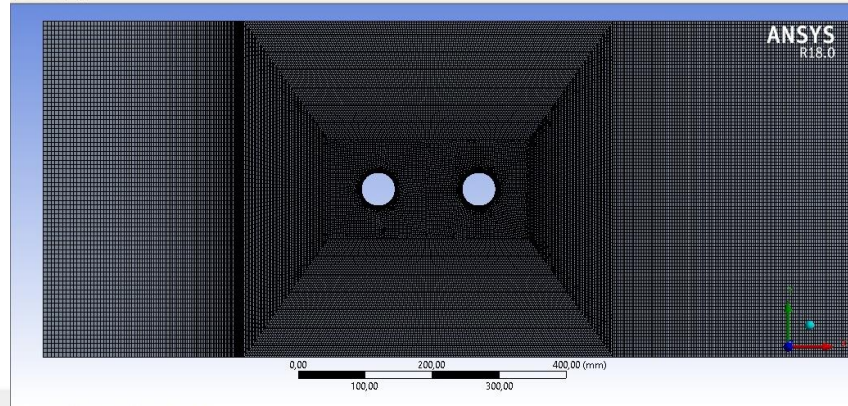
a) N durumu çözüm ağı

b) S durumu çözüm ağı

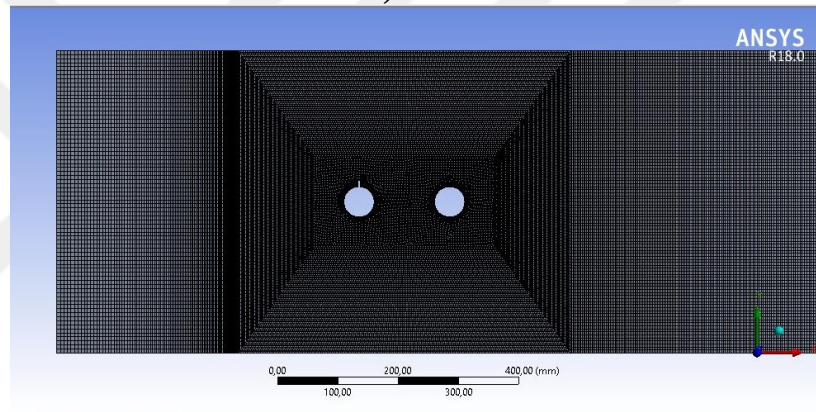
Şekil 2.19. Tekli silindirlerde oluşturulan çözüm ağı

Silindirlerin arka arkaya yerleştirilmesi durumunda silindirler arası mesafe $L/D = 2, 4$ ve 7 olması durumlarında oluşturulan ağ yapıları boşluk oranı ve silindir geometrilerine göre farklılık göstermiştir. Şekil 2.20 de $L/D = 2$ olması durumunda oluşturulan ağ yapısı, şekil 2.21 de $L/D = 4$ durumunda oluşturulan ağ yapısı ve şekil 2.22 de $L/D = 7$ için oluşturulan ağ yapısı verilmiştir. Çözüm ağı oluşturulurken genel ağ yapısının farklı olmamasına dikkat edilmiş ancak silindire başlık eklenmesi durumlarında oluşan geometrik farklılık nedeniyle ufak değişiklikler yapılmıştır. Şekillerde memba ve mansap silindirlerinin

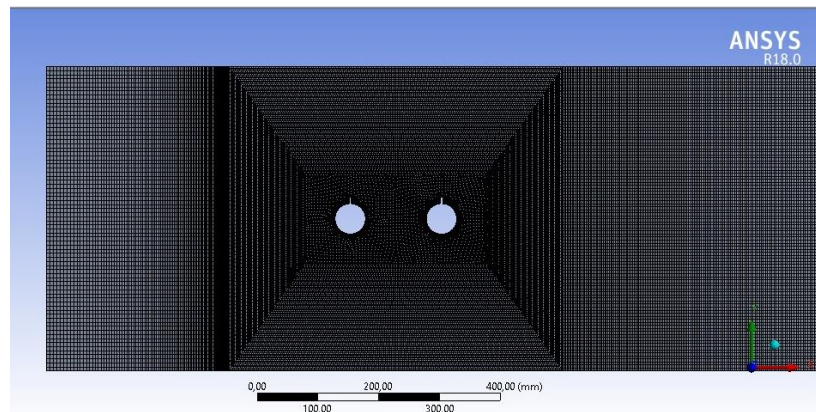
başlıklı veya başlıksız olması durumlarına göre oluşturulan ağ yapıları incelendiğinde genel ağ yapısının birbirine benzediği görülmektedir.



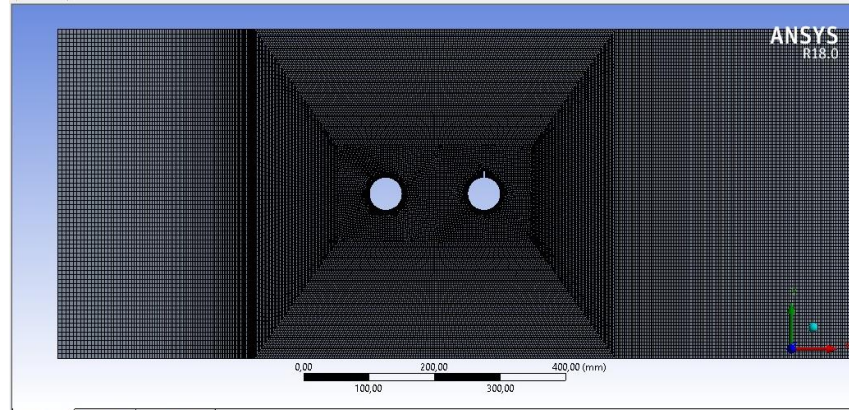
a) N2N



b) S2N

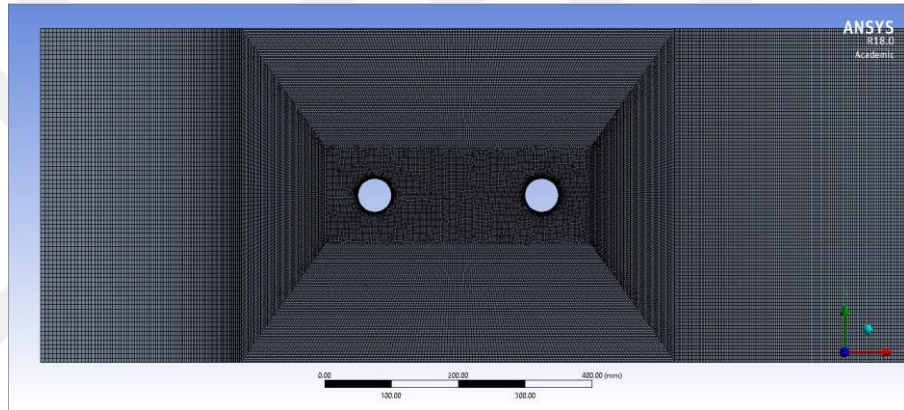


c) S2S

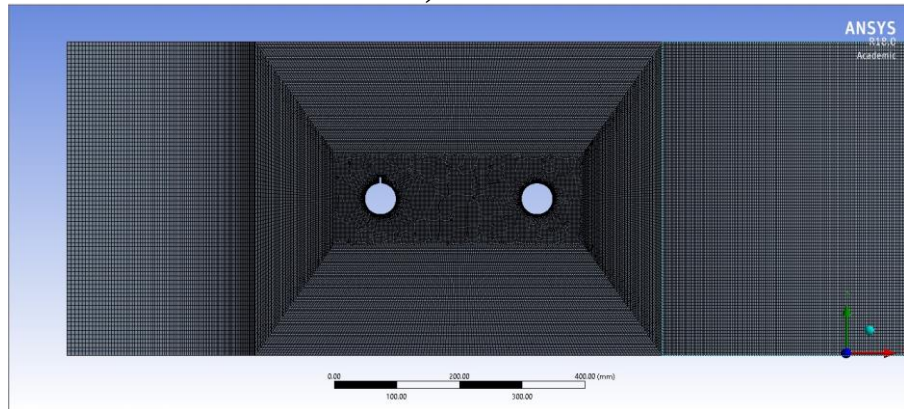


d) N2S

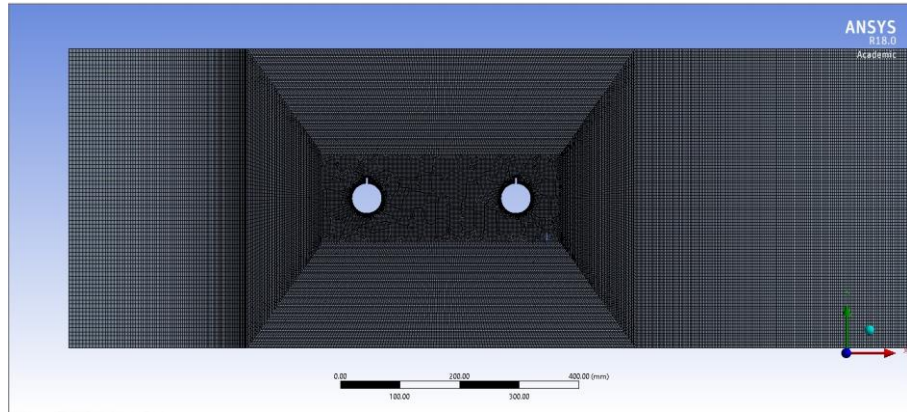
Şekil 2.20. $L/D=2$ olması durumunda oluşturulan çözüm ağı



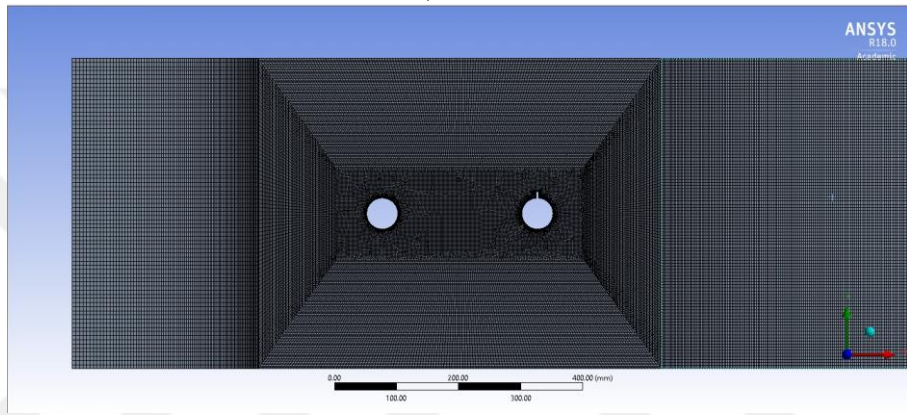
a) N4N



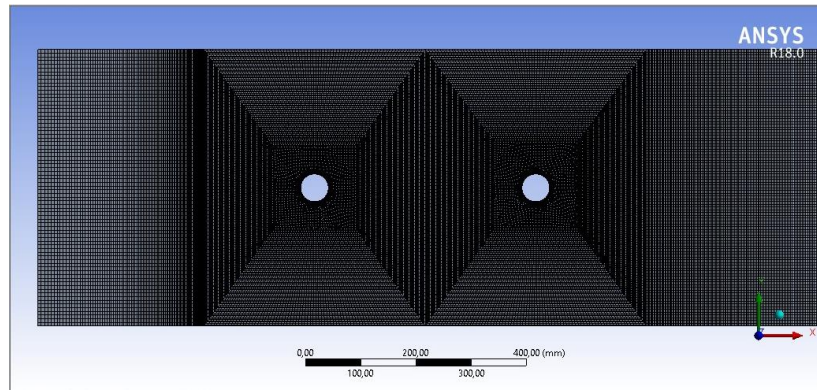
b) S4N



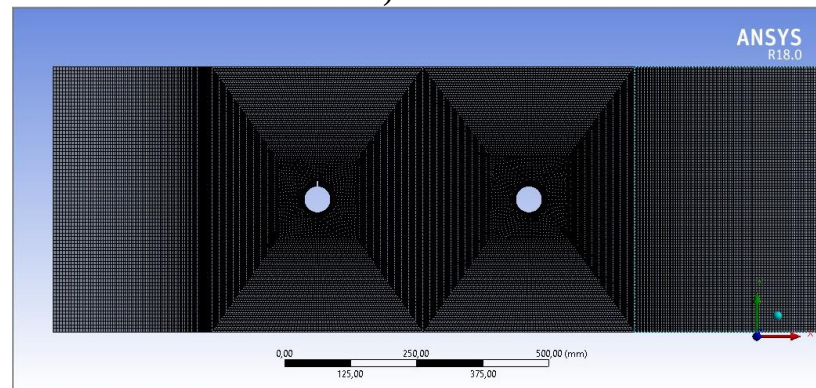
c) S4S



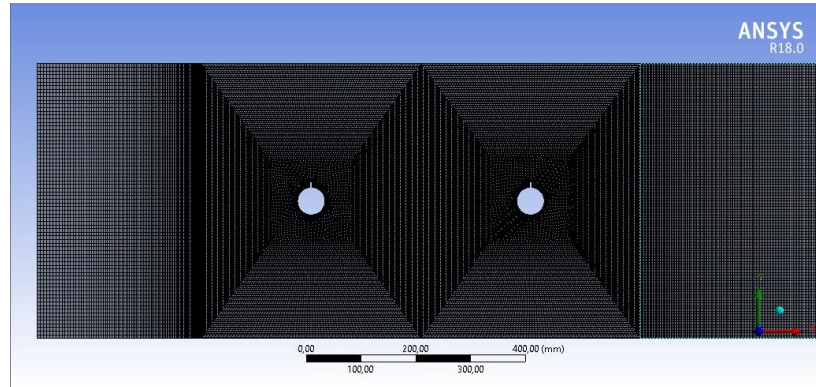
d) N4S

Şekil 2.21. $L/D=4$ olması durumunda oluşturulan çözüm ağı

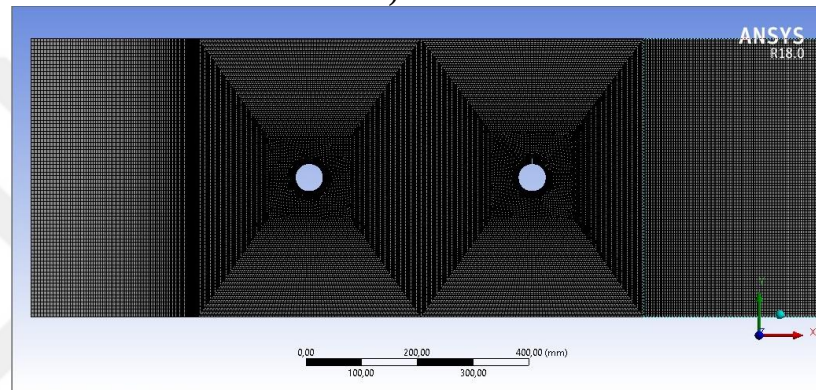
a) N7N



b) S7N



c) S7S



d) N7S

Şekil 2.22. $L/D=7$ olması durumunda oluşturulan çözüm ağı

$L/D = 2$ ve 4 durumları için oluşturulan ağ bölgeleri birbiri ile aynı olmasına karşın $L/D = 7$ durumunda boşluk oranı fazla olduğundan ara bölgeyi sıklaştırmak amaçlı farklı ağ bölgesi oluşturulmuştur. Bu çalışma kapsamında çözüm ağının sayısal sonuçlar üzerindeki etkisini ve oluşturulan ağ yapısının uygunluğunu belirlemek amacıyla Ağ Yakınsama İndeksi (GCI) yöntemi kullanılmıştır.

2.2.2.1. Ağ Yakınsama İndeksi (GCI)

Ağ yakınsama indeksi hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümlerinde ayırıklaştırma hatalarını test etmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir [54]. Bu yöntem ağ ayırıklaştırması nedeniyle mevcut belirsizliğin nicelleştirilmesine olanak sağlar. Ağ yakınsama indeksi; geliştirilmiş Richardson Ekstrapolasyon teorisinin biri kaba ve diğeri ince ağ yapısı olmak üzere iki farklı ağ boyutu çözümüne uygulanması ile elde edilen bir ağ yakınsama hata tahmini yöntemidir. Bu yöntemde kaba, orta ve ince olmak

üzere üç farklı yoğunlukta çözüm ağı kullanılır [55]. Ağ yakınsama indeksi yöntemine göre hata belirleme işlemi yapılırken;

$$d_3 < d_2 < d_1 \quad (2.9)$$

$$e_{12} = c_{d1} - c_{d2}, \quad e_{23} = c_{d2} - c_{d3}, \quad r_{12} = \frac{d_1}{d_2}, \quad r_{23} = \frac{d_2}{d_3} \quad (2.10)$$

$$p = \frac{1}{\ln(r_{23})} \ln \left(\frac{(r_{23}^p - 1)e_{12}}{(r_{12}^p - 1)e_{23}} \right) \quad (2.11)$$

$$E_{23} = \frac{c_{d3} - c_{d2}}{c_{d3}} \quad (2.12)$$

$$GCI_{23}^{ince} = F_s \frac{|E_{23}|}{r_{23}^p - 1} \quad (2.13)$$

İfadeleri ile verilen değerler hesaplanır. Bu denklemlerde d_1, d_2, d_3 ağ aralıklarını; C_{d1}, C_{d2}, C_{d3} verilen ağ aralıkları için elde edilen sürüklenme katsayılarını; p doğruluk mertebesini ve F_s güvenlik faktörünü ifade etmektedir. Roache [54] $r_{23}, r_{12} \geq 1,10$ olması gerektiğini belirtmiştir. Üç veya daha fazla ağ yapısı için ise güvenlik faktörü F_s 1,25 olmalıdır [56]. (2.13) numaralı denklemde verilen GCI_{23}^{ince} değerinin %2 altında olması durumunda ağdan kaynaklı sayısal çözüm sonuçlarının kabul edilebilir hata sınırına yakınsadığı ve hesaplamanın ağ yoğunluğundan bağımsızlaştığı sonucuna varılır.

Bu çalışmada ağ yakınsama indeksi çalışması yapılırken deneysel sonuçlardan elde edilen sürüklenme katsayısı ile sayısal analiz sonuçlarından elde edilen sürüklenme katsayıları kıyaslanmış ve işlemler bu duruma göre gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz çalışmalarının ağ yapısından bağımsızlaştığını belirlemek amacıyla üç farklı yoğunlukta çözüm ağı kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Hesaplama ağlarında farklı yoğunluk uygulaması yapılırken öncelikle Ağ 2 durumu olarak bir ağ yapısı oluşturulmuş, oluşturulan ağ eleman boyutları %50 oranında artırılarak Ağ 3, %50 oranında azaltılarak Ağ 1 durumları elde edilmiştir. Oluşturulan farklı ağ yapılarında elde edilen C_D sürüklenme katsayıları ile hesaplanan GCI_{ince} değerleri tablo 2.3'de verilmiştir. Tabloda verilen değerler

incelendiğinde Ağ 1 olarak tanımlanan kaba ağ çalışması için elde edilen değerler %2'den büyük olduğundan ağ bağımsızlığını sağlamamaktadır. Ağ 2 ve Ağ 3 için elde edilen değerler incelendiğinde her iki durumda da elde edilen değerler %2'den küçüktür. Ağ 3 olarak tanımlanan ağ yapısı ile oluşturulan geometrilerde analiz süresi Ağ 2' ye kıyasla oldukça fazla olduğundan sayısal modellemelerde Ağ 2 çözüm ağı kullanılmıştır.

Tablo 2.3. Farklı ağ yapıları için hesaplanan GCI_{ince} değerleri

Başlık ve Boşluk Durumu	GCI_{ince} (%)		
	Ağ 1	Ağ 2	Ağ 3
N	3,6975	1,7660	0,8804
S	4,5674	1,8790	0,4578
N2N	3,4679	1,2487	0,3569
N2S	3,7981	1,5678	0,4126
S2N	4,0125	1,3321	0,3896
S2S	3,9756	1,1566	0,3762
N4N	4,3612	1,7542	0,4587
N4S	4,2348	1,8023	0,4235
S4N	3,9982	1,5974	0,4761
S4S	4,3489	1,6952	0,5023
N7N	5,3789	1,8655	0,6478
N7S	5,2136	1,9025	0,6345
S7N	5,1423	1,6457	0,5791
S7S	5,3647	1,7632	0,5235

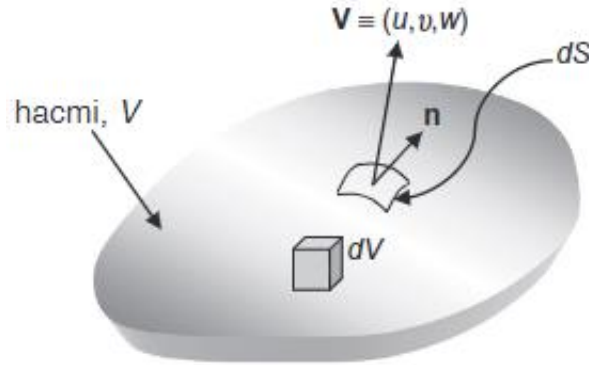
2.2.3. Temel Denklemler

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği akışkanlar dinamiğindeki temel denklemlere dayanmaktadır. Bu denklemler fizikteki korunum yasalarının matematiksel olarak ifade edilmesidir. Denklemlerin türetilmesinde kullanılan temel fizik yasaları; kütlenin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumudur.

2.2.3.1. Kütlenin Korunumu

Kütlenin korunumu yasası maddenin yoktan var, vardan da yok edilemeyeceği ile ilgilidir. Şekil 2.19' da uzayda ve zamanda hacmi V olan bir kontrol hacmi verilmiştir.

Kütlenin korunumu, kontrol hacmi içindeki kütle değişim hızının, $\bar{V}$ kontrol hacminin S yüzeyinden geçen net kütle akısına eşit olmasını gerektirir.



Şekil 2.23. Uzayda sonlu kontrol hacmi [53]

Kütlenin korunumu integral formda ifade edilecek olursa;

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho V = - \int_S \rho V \cdot n dS \quad (2.14)$$

Formülde verilen n birim normal vektörü ifade eder. Burada Gauss diverjans teoremi uygulanırsa;

$$\int_V \text{div} \rho V dv = - \int_S \rho V \cdot n dS \quad (2.15)$$

Denklem (2.15)' de verilen teorem kullanılarak, denklem (2.14)' deki yüzey integrali yerine hacim integrali yazılabilir. Böylece denklem;

$$\int_V \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) \right] dV = 0 \quad (2.16)$$

haline gelir. Burada $\nabla \cdot (\rho V) \equiv \text{div} \rho V$ olarak da yazılabilir. Denklem (2.16) her boyuttaki $\bar{V}$ hacmi için geçerlidir. Buna göre köşeli parantez içi sıfır olmalıdır.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (2.17)$$

Denklem (2.17) kütlenin korunumu denklemidir ve kartezyen koordinatlarda;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.18)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada akış alanındaki herhangi bir noktada akışkan hızı olan V , yerel hız bileşenleri olan u , v ve w ile ifade edilir. Bu hız bileşenleri genelde konumun ve zamanın fonksiyonudur.

2.2.3.2. Enerjinin Korunumu

Enerjinin korunumu denklemi termodinamiğin birinci yasa da türetilmiş bir denklemdir. Enerjinin korunumu kanununa göre, enerjinin değişim hızı birim zamanda verilen net ısı ile birim zamanda yapılan net işin toplamıdır. İki boyutlu sıkıştırılabilir akış için enerjinin korunumu denklemi;

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} = \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \Phi \quad (2.19)$$

Denklem (2.19)'da Φ yitim fonksiyonu, λ ısı iletim katsayısıdır. Akışın sıkıştırılamaz olduğu özel durum incelendiğinde; birçok akış probleminde yitim fonksiyonu ve basıncın zamana göre türevi ihmal edilebilir. Entalpinin tanımına göre $h = C_p T$ şekline indirgenebilir. Burada C_p özgül ısıdır ve sabit kabul edilir. Sıcaklığın z eksenini boyunca değişmediği ve ısı iletim katsayısının sabit olduğu durumda, iki boyutlu sıkıştırılamaz bir akış için enerjinin korunumu denklemi (2.20)' de olduğu şekliyle; ivme= difüzyon olarak ifade edilir.

$$\rho C_p \frac{Dh}{Dt} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.21)$$

Denklem (2.20) düzenlenirse enerjinin korunumu denklemi (2.21) de verilen yerel ivme ile adveksiyonun toplamının difüzyona eşit olması halini alır.

2.2.3.3. Momentumun Korunumu

Momentumun korunumu kanunu, Newton'un ikinci hareket yasasına göre ifade edilir. Bu denklem akışkanın yoğunluğu, hız bileşenleri ve akışkanda meydana gelen yüzey gerilme bileşenleri arasında bağlantı oluşturan kısmi diferansiyel denklemdir. Cauchy denklemi doğrusal momentumun korunumu yasasının diferansiyel formudur. Cauchy denklemi

hem sıkıştırılabilir hem de sıkıştırılmaz akışlar için kullanılır. Newton'un ikinci yasası kullanılarak Cauchy denklemi elde edilmek istendiğinde;

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad (2.22)$$

Burada m akışkanın kütesini, a ise akışkan elemanın ivmesini ifade etmektedir. Akışkan elemanın ivmesi $\vec{a} = D\vec{V} / Dt$ olarak ifade edilebilir. Bu durumda denklem (2.22) düzenlenirse;

$$\sum \vec{F} = m \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho dx dy dz \frac{D\vec{V}}{Dt} \quad (2.23)$$

İfadesi elde edilir. Herhangi bir zamandaki diferansiyel akışkan elemanı üzerindeki net kuvvet, diferansiyel kontrol hacminde hesaplandığı şekliyle hesaplanır. Akışkana etki eden kuvvetler yazılarak denklem (2.23) düzenlendiğinde;

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \sigma_{ij} \quad (2.24)$$

Şeklinde Cauchy denklemi elde edilmiş olur. Cauchy denklemi ile herhangi bir akışkanlar mekaniği probleminin çözümü mümkün değildir. Bunun nedeni σ_{ij} gerilme tensörünün problemdeki bilinmeyenler olan yoğunluk, basınç ve hız cinsinden ifade edilmesi gerekliliğidir. Gerilme tensörünün ana bilinmeyenler cinsinden ifadesi Navier-Stokes denklemleri ile yapılır. Louis Henri Navier ve George Stokes newtonien akışkanlara sürtünme terimlerini de ilave ederek bütün akışları analiz etmede başarılı olan ve Navier-Stokes denklemleri olarak bilinen momentum denklemlerini bulmuşlardır.

2.2.3.4. Navier-Stokes Denklemleri

Navier-Stokes denklemleri, sıkışmayan Newtonien akışkan akımı için hareket denklemleri olarak ifade edilmektedir. Newton'un ikinci kanununun sonsuz küçük bir kontrol hacmine uygulanmasıyla Newtonien bir akışkan için aşağıdaki Navier-Stokes denklemleri türetilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.25)$$

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g \quad (2.26)$$

Denklem (2.25) kütlenin korunumunu, denklem (2.16) momentumun korunumu temsil etmektedir. Burada V hız vektörünü, τ gerilme tensörünü, ρ yoğunluğu, g yerçekimini, t zamanı, p basıncı göstermektedir. Su sıkışmaz kabul edildiğinden yoğunluk sabittir. Bu nedenle;

$$\frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (2.27)$$

Böylelikle süreklilik ve momentum denklemi aşağıdaki forma indirgenir.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (2.28)$$

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla) V \right) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g \quad (2.29)$$

Yukarıdaki ifadeler ayrıca tensör formatında aşağıdaki gibi ifade edilebilirler.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.30)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2.31)$$

Burada üç boyutlu akımlar için $i, j = 1, 2, 3$ değerlerini alır ve sırasıyla x, y, z doğrultularındaki akım bileşenlerini temsil etmektedir. Yapılan çalışmada akışkan sıkışmaz ve Newtonien kabul edildiğinden gerilme tensörü, dinamik viskozite katsayısı μ ve şekil değiştirme hızları ile orantılıdır:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.32)$$

Bu ifade denklem (2.31) de yerine konulursa momentum denklemi aşağıdaki biçimi alır.

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i \quad (2.33)$$

Süreklilik ve momentum denklemleri kartezyen koordinatlarda daha açık biçimde yazılırsa Navier-Stokes denklemleri aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.34)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (2.35)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (2.36)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (2.37)$$

Serbest yüzeyli akımlarda bu ifadelerde etki eden tek kütleli kuvvet yerçekimi kuvvetidir. Dolayısıyla ifadelerdeki g_x ve g_y terimleri sıfıra eşittir.

Bu denklem sistemine bakıldığında bilinmeyenler basınç p ve hız vektörünün üç bileşeni u , v , w olmak üzere dört adettir. Bununla birlikte sistemde bir süreklilik ve üç adet lineer momentum denklemi olmak üzere toplam dört adet denklem bulunmaktadır. Görüldüğü gibi sistemin bilinmeyen sayısı denklem sayısına eşittir. Buna karşın sıkışmayan, sabit viskoziteli akışkanlar için geçerli olan bu denklem sisteminin genel bir çözümü yoktur. Ancak uygun başlangıç ve sınır şartları altında sayısal yöntemler ile çözülebilirler. Bunun için yoğunluk, viskozite ve yerçekiminin bilinmesi gereklidir. Sonuç olarak denklem (2.35), (2.36), (2.37) den oluşan hareket denklemleri aşağıdaki gibi kapalı formda da yazılabilir.

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + \rho g \quad (2.38)$$

Navier-Stokes denklemlerinde viskozite içeren terimler ihmal edildiğinde, aşağıdaki Euler denklemleri elde edilir.

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \rho g \quad (2.39)$$

Bu denklemlerde viskozite terimlerinin bulunmamasının yanında sınır koşulları da farklılıklar gösterir. Viskoz bir akışkanın katı bir sınırdaki hız vektörü sıfırdır. Bu da akışkanın katı madde sınırını ne geçebileceği ne de bu sınır üzerinde kayabileceği anlamına gelmektedir.

2.2.3.5. Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) Denklemleri

Gerçek akışkanların hareketinde, akım durumu Reynolds sayısına bağlı olarak laminar veya türbülanslı olabilmektedir.

$$R_e = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.40)$$

Burada V ortalama hızı, L ise karakteristik boyu, ρ yoğunluğu, μ ise dinamik viskozite katsayısını göstermektedir. Reynolds sayısının büyümesi akımın çalkantıya karşı duyarlılığını gösterir ve açık kanal akımlarında laminar akımdan türbülanslı akıma geçiş için kritik Reynolds sayısı 500 olmaktadır. Birçok mühendislik problemi gibi silindir etrafındaki akım da oldukça türbülanslı bir yapıya sahiptir. Bununla birlikte çok karmaşık olan türbülanslı akımın yapısı matematiksel olarak tam çözülememiştir.

Türbülanslı akım alanında herhangi bir noktada hız ve basınç gibi akım büyüklüklerinin şiddeti ve yönü zamana bağlı olarak gelişigüzel değişebilmektedir. Buna göre hız ve basıncın herhangi bir andaki değeri ortalama ve anlık sapmaların toplamı şeklinde yazılabilir:

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad w = \bar{w} + w', \quad p = \bar{p} + p' \quad (2.41)$$

Burada $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}$ hız ve basınca ait ortalama değerleri, u', v', w', p' ise bunlara ait anlık sapmaları temsil etmektedir. Denklem (2.41) de verilen u, v, w değerleri denklem (2.34) de verilen süreklilik denkleminde yerine yazılacak olursa;

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{u} + u') + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v} + v') + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{w} + w') = 0 \quad (2.42)$$

Bir Δt intervali için süreklilik denkleminin ortalaması alınır;

$$\overline{\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (2.43)$$

ifadesi bulunur. Denklem (2.43)' teki ifade (2.42)' den çıkarılırsa;

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (2.44)$$

denklemini elde edilir ki ortalama hız bileşenleri türbülans ve hız sapmalarının aynı süreklilik denklemini sağladığı görülmektedir.

2.2.3.5.1. Sıkışmayan Türbülanslı Akımda Hareket Denklemleri

Navier-Stokes denklemlerinin x bileşeni ele alınıp denklem (2.41) deki ifadeler denklem (2.35)' te yerine koyulursa;

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial t} + (\bar{u} + u') \frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial x} + (\bar{v} + v') \frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial y} + (\bar{w} + w') \frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial z} \right) \\ &= - \frac{\partial (\bar{p} + p')}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 (\bar{u} + u')}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\bar{u} + u')}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 (\bar{u} + u')}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \end{aligned} \quad (2.45)$$

Formülü elde edilir. Denklem (2.45)' te her bir terimin zamana göre ortalaması alınırsa $u' = 0$ olur Böylece x doğrultusu için;

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u} \bar{u}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u} \bar{v}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u} \bar{w}'}{\partial z} \right) \\ &= - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \end{aligned} \quad (2.46)$$

denklemini elde edilir. Çalkantı ifadeleri eşitliğin sağ tarafına alınır

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)$$

$$= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad (2.47)$$

(2.47) denklemi y ve z doğrultuları için de benzer şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) + \rho g_y \end{aligned} \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right) + \rho g_z \end{aligned} \quad (2.49)$$

Elde edilen bu RANS denklemleri tensör notasyonu ile aşağıdaki biçimde gösterilebilir.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.50)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \frac{\partial (\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2.51)$$

(2.51) denklemi, denklem (2.33)'te verilen Navier-Stokes denklemleri ile karşılaştırıldığında ilave olarak $\partial(\overline{u_i u_j})/\partial x_j$ ifadesini içerdiği görülmektedir. Bu ifade türbülansın dolaylı olarak oluşan çalkantı gerilmelerini ya da literatürdeki ismiyle Reynolds gerilmelerini temsil etmektedir. Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri olarak bilinen bu denklemlerde akım büyüklükleri hız ve basınç ortalama değerler ile ifade edilmektedir.

Laminer akım durumunda Navier-Stokes denklemlerinde dört bilinmeyen ve dört denklem olmasına karşılık türbülanslı akım denklemlerinde (RANS) u', v', w' terimlerinin

eklenmesiyle bilinmeyen sayısının artması yeni denklemlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu yeni denklemler türbülans modelleriyle elde edilir. Denklem sayısının bilinmeyen sayısına eşitlenmesine kapatma (closure) işlemi denilmektedir. Kapatma işleminin nasıl yapılacağı konusunda henüz bir fikir birliği oluşmadığından değişik türbülans modelleri kullanılmaktadır.

Bu denklemlerdeki türbülans gerilme terimleri, μ ile ölçülen moleküler viskoziteye benzer şekilde μ_t katsayısı ile ölçülen ve türbülans (eddy) viskozitesi olarak adlandırılan yeni bir viskoziteden kaynaklanmış gibi düşünülebilirler.

Bu amaçla $\tau'_{ij} = -\rho \overline{(u'_i u'_j)}$ türbülans gerilmelerini (Reynolds gerilmeleri) ve denklem (2.32)'daki τ_{ij} laminar viskozite gerilmelerini göstermek üzere, denklem (2.51) gerilmeler cinsinden yeniden yazılacak olursa;

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2.52)$$

eşitliği elde edilir. Gerilme ifadeleri $\partial / \partial x_i$ parantezine alınırsa

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial (\tau_{ij} + \tau'_{ij})}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2.53)$$

denklemini ortaya çıkar. Görüldüğü gibi RANS (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) denklemlerinde toplam gerilme laminar ve türbülans gerilmelerinin toplamı şeklinde yazılabilir ($\tau_T = \tau + \tau'$). Genellikle ele alınan türbülans modellerinde Reynolds gerilmeleri, τ'_{ij} , için denklemlerdeki diğer terimlerin bir fonksiyonu olarak ele alınan ampirik ifadeler kullanılmaktadır. Bu modellerden Boussinesq hipotezi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu hipoteze göre Reynolds gerilmeleri viskoz gerilmelere benzer biçimde ortalama hız gradyanlarıyla ilişkilendirilir.

$$\tau'_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.54)$$

Burada μ_t türbülans viskozitesini göstermektedir ve dinamik viskozite μ gibi akışkanın fiziksel bir özelliği değildir. μ_t akımdaki hız çalkantılarına bağlıdır. Başka bir ifade ile aynı akışkan için farklı akım koşullarında değişik değerler almaktadır. Dolayısıyla zamana bağlı RANS (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) denklemlerinin çözülebilmesi için μ_t türbülans viskozitesinin değerinin hesaplanması gereklidir. Bu da farklı türbülans modelleri yardımıyla gerçekleştirilir.

2.2.4. Türbülans Kapatma Modelleri

Üç boyutlu akışta, Reynolds denklemlerinde bir adet basınç, üç adet hız bileşeni bulunmaktadır. Türbülans kayma gerilmelerinin de işleme dâhil edilmesiyle üç boyutlu akış için altı adet değişken de bilinmeyenler arasına eklenir. Toplamda on adet bilinmeyene karşılık çözüm için dört adet denklem bulunduğundan denklemin çözümü mümkün olmayacaktır. Reynolds kayma gerilmelerinin sebebiyet verdiği bu duruma Kapanma Problemi denilmektedir. Türbülans modeli kullanımı; denklem (2.54)'de bulunan τ'_{ij} ifadesinin hesaplanmasını sağlamakta ve sonuç olarak da denklem sisteminin kapanmasını gerçekleştirmektedir. Bu çalışmada Standart k- ϵ (SKE) ve SST k- ω türbülans modelleri kullanıldığından yalnızca bu modellere ait bilgiler verilmiştir.

2.2.4.1. Standart k- ϵ Türbülans Modeli (SKE)

Standart k- ϵ türbülans modelinde, Reynolds denklemlerine ek olarak türbülans kinetik enerjisi k ve onun kayıp oranı disipasyonu ϵ için iki adet transport denklemi, çözülmektedir. Navier-Stokes denklemlerinden ϵ için gerçek transport denkleminin elde edilmesi mümkündür [57]. Ancak elde edilen denklemler oldukça karmaşıktır ve birçok bilinmeyen içermektedir. Bu sebeptendir ki, araştırmacılar bu denklemler yerine çok daha sadeleştirilmiş bir hali olan modellenmiş ϵ denklemini türbülans modellerinde kullanılmak üzere adapte etmişlerdir. Her modelde olduğu gibi bu modelde de pek çok yaklaşım, varsayım ve ihmal söz konusudur. Sonuç olarak, modellenmiş ϵ transport denklemi, k transport denkleminin çok benzer bir formda ve basitleştirilmiş biçimde kullanılmaktadır.

k- ϵ türbülans modelinde türbülans viskozitesi;

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.55)$$

Olmaktadır. C_μ türbülans modeli sabitidir.

Standart k- ε türbülans modeli, iki denklemlili türbülans modelleri arasında birçok akım türü için yakınsak sonuç vermesi nedeniyle yaygın kullanılan yarı ampirik bir modeldir. SKE türbülans modeli, türbülans kinetik enerjisi k ve kayıp oranı ε için yazılan iki adet transport denkleminin çözümü ve türbülans viskozitesinin hesabını içerir. Kaldırma kuvvetleri etkisi ihmal edildiğinde, bu transport denklemleri k ve ε için sırası ile;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1e} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2e} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (2.57)$$

olarak yazılır. Bu denklemlerdeki difüzyivite terimleri;

$$\Gamma_\varepsilon = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \quad \Gamma_k = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \quad (2.58)$$

şeklinde olur. Türbülans kinetik enerjisi üretimini ifade eden terim ise denklem (2.59) teki gibi ifade edilir.

$$G_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.59)$$

Denklem (2.57) deki R kaynak terimdir ve SKE modeli için değeri 0'dır. SKE modeli için $C_{1e} = 1,44$, $C_{2e} = 1,92$, $C_\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1$ ve $\sigma_\varepsilon = 1,3$ 'tür. Bu katsayılar deneysel olarak elde edilmiş sabitlerdir [58], [59]. Denklem (2.56) ve denklem (2.57) aşağıdaki şekilde ifade edilebilirler.

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{k veya } \varepsilon \text{ 'nun} \\ \text{değişim} \\ \text{miktarı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{k veya } \varepsilon \text{ 'nun} \\ \text{konveksiyonla} \\ \text{taşınamı} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{k veya } \varepsilon \text{ 'nun} \\ \text{difüzyonla} \\ \text{taşınamı} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{k veya } \varepsilon \text{ 'nun} \\ \text{üretim} \\ \text{miktarı} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{k veya } \varepsilon \text{ 'nun} \\ \text{kayıp} \\ \text{miktarı} \end{array} \right\}$$

2.2.4.2. Standart k- ω Türbülans Modeli (SKW)

Temelini k- ε türbülans modelinin oluşturduğu, iki denklemlilik türbülans modellerinden biri olan standart k- ω türbülans modelinde; türbülans viskozitesi (2.60) denklemi ile hesaplanmaktadır [60].

$$\eta = \rho \frac{k}{\omega} \quad (2.60)$$

Denklem (2.60)'daki ω , özgül kayıp oranıdır ve birim türbülans kinetik enerji için türbülans kayıp oranını (ε/k) temsil etmektedir ve formüsel şekli (2.61)'deki gibidir.

$$\omega = \frac{\varepsilon}{c_\eta k} \quad (2.61)$$

Bu modelde k'nın yanı sıra ω için ikinci bir transport denkleminin çözülmesine ihtiyaç duyulur. k- ω modeli; k- ε modeline göre daha az bilinen bir model olmasına karşın, pozitif basınç gradyanının oluştuğu sınır tabakası akımlarında daha iyi sonuç vermektedir [60].

2.2.4.3. SST k- ω Türbülans Modeli (SST)

Shear Stress Transport-SST modeli, katı sınıra yakın akım bölgelerinde Standart k- ω [60] uzak bölgelerinde ise Standart k- ε türbülans modelinin daha uygun olduğu varsayımından hareketle; iki modelin üstünlüklerini tek modelde birleştiren bir türbülans modelidir. Bu model, bir karışım fonksiyonu yardımı ile modelin katsayılarını, geçerli olduğu varsayılan bölgeler itibarıyla SKW ve SKE model katsayılarına uyarlayarak, katı sınıra yakın yerlerde (türbülanslı iç bölgede) SKW modeli ile uyum sağlarken, katı sınırdan uzaklaştıkça (türbülanslı dış bölgede) yumuşak bir geçişle SKE türbülans modeline yaklaşmaktadır [61]. F_1 karışım fonksiyonunu temsil etmek üzere, SST modelindeki transport denklemleri aşağıdaki şekliyle verilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k \quad (2.62)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (2.63)$$

$\Omega(=\varepsilon/k)$ türbülans kinetik enerjisi özgül kayıp oranıdır. Bu modeldeki farklı sabitler, orijinal k- ω (ϕ_1) ve dönüştürülmüş k- ε (ϕ_2) model katsayılarının enterpolasyonu ile elde edilir, yani:

$$\phi = F_1\phi_1 + (1-F_1)\phi_2 \quad (2.64)$$

Örneğin; $\phi = \sigma_k$ ve $\phi = \sigma_\omega$ için;

$$\sigma_k = F_1\sigma_{k1} + (1-F_1)\sigma_{k2} \quad \sigma_\omega = F_1\sigma_{\omega1} + (1-F_1)\sigma_{\omega2} \quad (2.65)$$

k- ω için ϕ_1 sabitleri:

$$\sigma_{k1} = 0,85, \sigma_{\omega1} = 0,50, \beta_1 = 0,075, \beta^* = 0,090, \kappa = 0,41$$

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega1}\kappa^2}{\sqrt{\beta^*}} \quad (2.66)$$

k- ε için ϕ_2 sabitleri:

$$\sigma_{k2} = 1,00, \sigma_{\omega2} = 0,856, \beta_2 = 0,0828, \beta^* = 0,090, \kappa = 0,41$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega2}\kappa^2}{\sqrt{\beta^*}} \quad (2.67)$$

F_1 fonksiyonu aşağıdaki gibidir;

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega} \right); \frac{4\rho\sigma_{\omega2}k}{CD_{k\omega}y^2} \right] \right\}^4 \quad (2.68)$$

Burada;

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-20} \right) \quad (2.69)$$

ve y en yakın duvar uzaklığını göstermektedir.

İlave olarak, Menter, türbülans kayma gerilmesindeki taşınım etkisini göz önüne almak amacı ile türbülans viskozitesini aşağıdaki gibi modifiye etmiştir. $k-\omega$ modelinin, yapılan bu değişiklik ile pozitif basınç gradyanına sahip sınır tabakası akımlarının analizinde ve sınır tabakası ayrılma yerinin belirlenmesinde SKE modeline göre daha başarılı olduğu görülmüştür. Bradshaw [62], hipotezine dayanarak, bir sınır tabakası içindeki kayma gerilmesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\tau = \rho a_1 k \quad (2.70)$$

Burada sabit değer $a_1 = 0,31$ 'dir. (2.70) denkleminin sağlanması için türbülans viskozitesi yeniden tanımlanırsa;

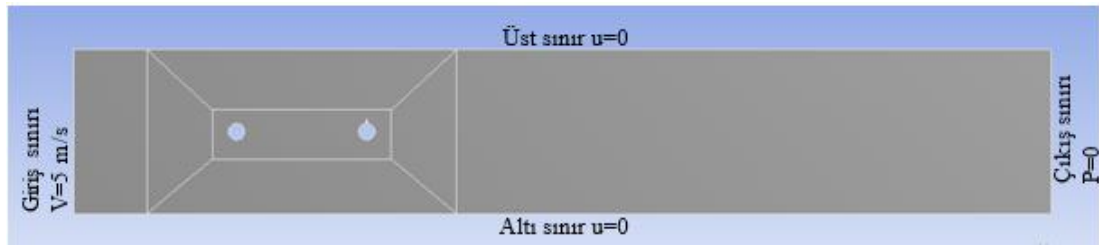
$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \zeta F_2)} \quad (2.71)$$

$$F_2 = \tanh \left[\max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}; \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) \right] \quad (2.72)$$

Burada; ζ ortalama viskozitenin mutlak değeri, $\zeta = |\partial \bar{u} / \partial y|$ olup, F_2 fonksiyonu sınır tabakası akımı için 1, serbest türbülanslı kayma tabakaları için 0 değerini alır.

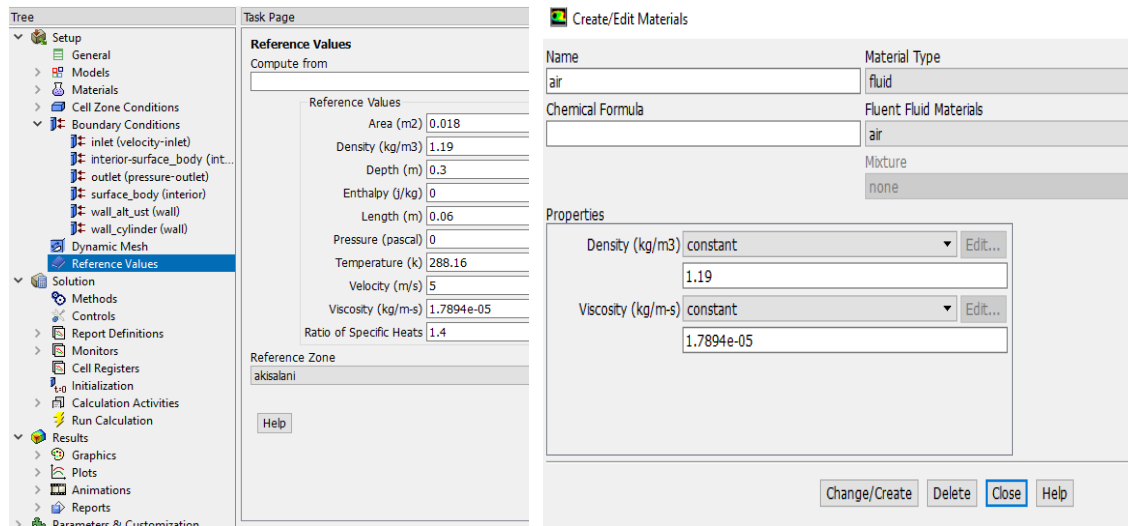
2.2.5. Başlangıç ve Sınır Şartları

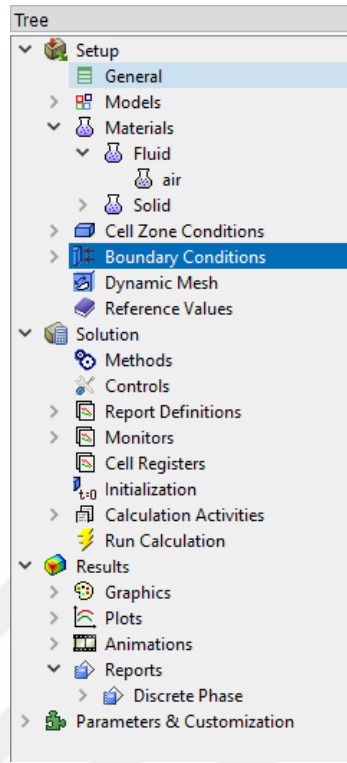
Silindir etrafındaki akışın sayısal analizi gerçekleştirilirken kullanılan çözüm bölgesi sınır şartları örnek olması amacıyla $L/D = 7$ boşluk oranı için Şekil 2.20'de verilmiştir. Yapılan tüm analizlerde kullanılan sınır şartları deneysel koşullardaki ile aynı olacak şekilde seçilmiştir. Buna bağlı olarak kanal girişinde 5 m/s rüzgâr hızı olacak şekilde hız girişi verilmiş, çıkış sınır şartı olarak atmosfere açıldığı düşünülerek basınç çıkışı verilmiştir. Kanal alt ve üst tabanları ise duvar olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.24. Sayısal analiz çözüm bölgesi ve sınır şartları

Rüzgâr tüneline gerçekleştirilen deneyleri temsil etmesi amacıyla malzeme olarak hava kullanılmış ve hava için de deney şartlarında ölçülen hava yoğunluğu ve viskozite değerleri girilmiştir. Türbülans için analizlerde iki farklı türbülans modeli kullanılmıştır. SST k- ω ve standart k- ϵ türbülans modelleri kullanılarak bütün analizler yapılmış ve hangi durumda hangi türbülans modelinin uygun olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Analiz çıktısı olarak elde edilmek istenen sürüklenme ve kaldırma katsayılarının doğru şekilde elde edilebilmesi amacıyla referans değer kısmına alan, derinlik ve uzunluk değerleri girilmiştir. Şekil 2.21’de bahsi geçen malzeme özellikleri ve referans değerlere ait alınmış örnek ekran görüntüsü verilmiştir. Başlık durumuna göre silindir yüksekliği değiştiğinden referans değerler analiz şartlarına göre farklılık göstermektedir.





Şekil 2.25. Sayısal analiz referans değerleri, malzeme özellikleri ve işlem akış şeması

Analizler gerçekleştirilirken zamana bağlı çözüm yapılmıştır. Zaman adımı çözümlerde hassas sonuç elde edilmesi konusunda önemlidir. Analizlerde girdap kopmasını tam olarak belirleyebilmek için bir kopma devrinde en az 20 zaman adımı olması gerekir [63]. Modelin özellikleri dikkate alındığında zaman adımı olarak 0,0001 sn belirlenmiştir. Seçilen zaman adımında tüm durumlar için girdaplar gözlenebilmektedir.

BÖLÜM 3

BULGULAR

3.1. Giriş

Bu bölümde öncelikle deneysel olarak elde edilen veriler sunulmuştur. Duman deneyi ile elde edilen görüntüler, sıcak tel anemometresi ile yapılan deneylerden elde edilen veriler, kuvvet ölçüm deneylerinden elde edilen veriler ve basınç ölçümü ile elde edilen veriler görsel hale ve grafik formuna getirilerek verilmiştir.

Bölüm devamında, deneysel çalışmalardan elde edilen veriler doğrultusunda yapılan sayısal analiz sonuçları verilmiştir. Sayısal analizler tüm deney durumları için gerçekleştirilmiş olsa da tez kapsamında seçilen belirli analizlerin sonuçları paylaşılmıştır.

3.2. Deneysel Bulgular

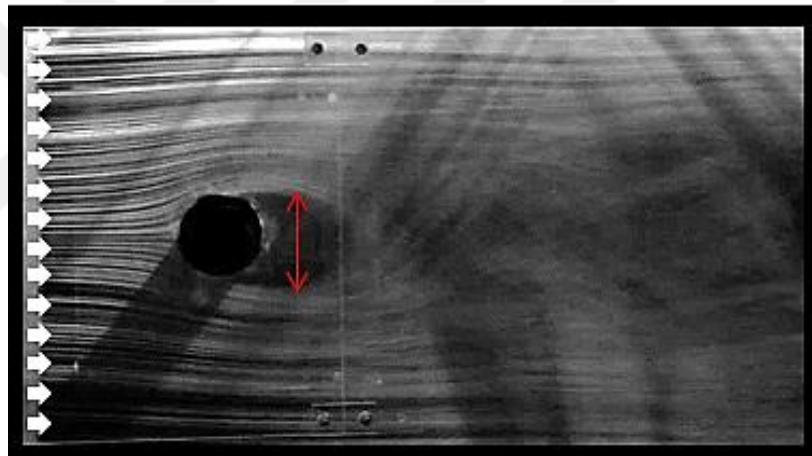
Rüzgâr tüneline gerçekleştirilen deneylerde 5 m/s rüzgâr hızına karşılık gelen $Re = 14000$ değeri ile çalışılmıştır. Deneyler N ve S durumundaki silindiler ile arka arkaya yerleştirilmiş ve boşluk oranı $L/D = 2, 4$ ve 7 olan NN, NS, SN ve SS şeklinde olacak şekilde 14 farklı durum için yapılmıştır.

Verilen tüm durumlarda duman teli ile akım görselleştirme deneyi yapılarak silindir etrafındaki akış, girdap kopmaları görsel olarak elde edilmiştir. Video formunda yapılan deneysel kayıt verileri düzenlenerek fotoğraf formatına getirilmiş ve görselleri bölüm içerisinde verilmiştir. Sıcak tel anemometresi deneyi ile silindirlerin arasında ve mansap silindiri iz bölgesinde tek bir hat boyunca 1 mm aralıklarla hız ölçümü yapılmıştır. Bu deney verilerine bağlı olarak hız profilleri çıkarılmış, ayrıca girdap kopma frekansları ve frekans değerlerinden de Strouhal sayıları edilmiştir. Aerodinamik kuvvet ölçüm deneyi ile elde edilen sürüklenme ve kaldırma katsayılarına ait bulgular bölüm içerisinde

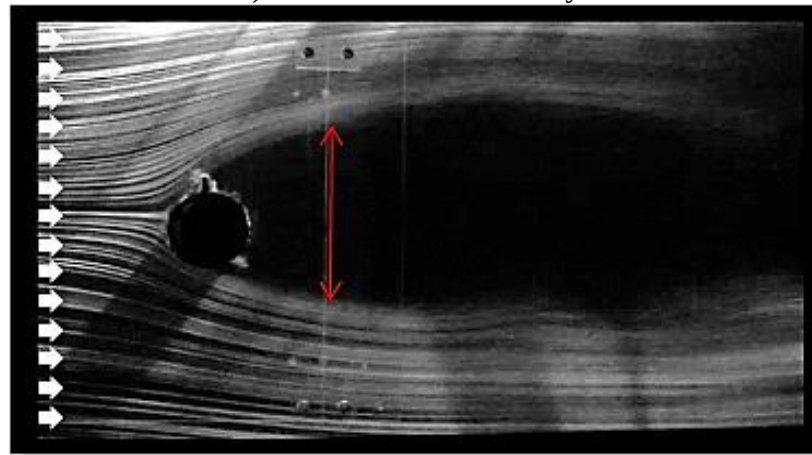
verilmiştir. Silindirler içersine yerleştirilen basınç ölçüm noktaları ile yapılan basınç ölçüm deneylerinden elde edilen veriler ile basınç grafikleri oluşturulmuş ve bölüm kapsamında verilmiştir.

3.2.1. Duman Teli ile Akış Görselleştirilmesi Deney Bulguları

Duman deneyleri yapılırken elde edilen sonuçlar kamera ile kayıt altına alınmıştır. Kameralardan bir tanesi tam karşıdan görüntü alacak şekilde yerleştirilmiş olup diğer iki kamera memba ve mansap kısımlarını görüntüleyecek şekilde yerleştirilmiştir. Kaydedilen bu video görüntüleri Adobe Premiere Pro 2020 programı kullanılarak düzenlenmiş ve tam karşıdan görüntü alan kamera ile kaydedilen videolar fotoğraf karesi olarak kaydedilmiş ve sonuçlar bu şekilde verilmiştir.



a) N durumu duman deneyi

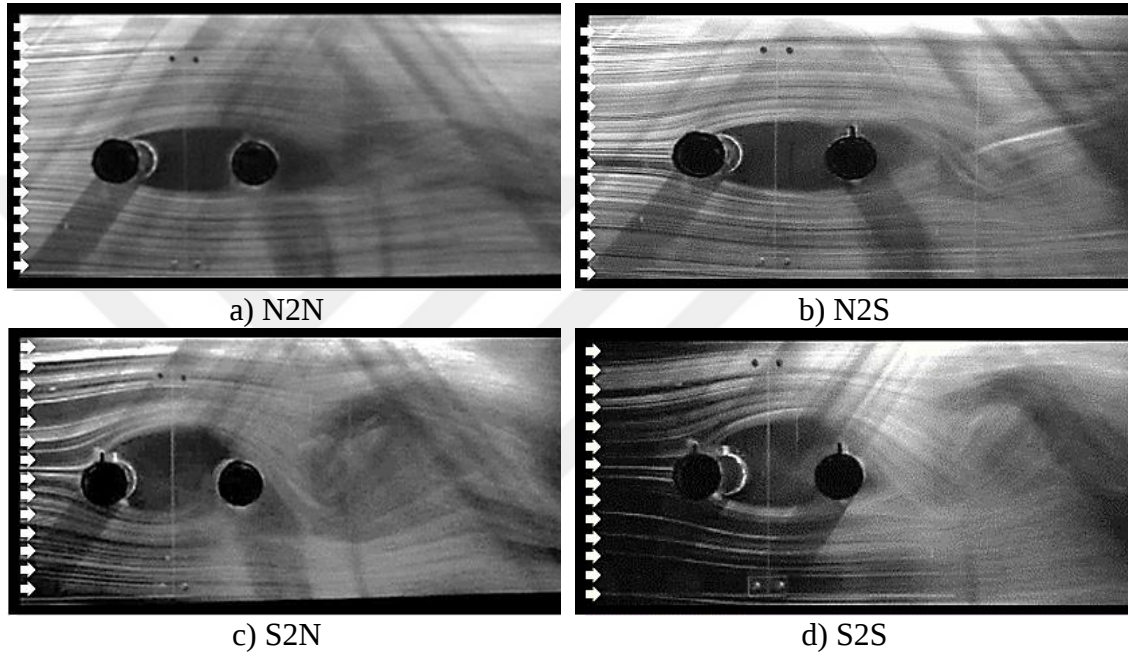


b) S durumu duman deneyi

Şekil 3.1. Tekli silindirlerde elde edilen duman deneyi görüntüleri

Şekil 3.1’de başlıksız ve başlıklı tek silindir için yapılan duman deneyi görselleri verilmiştir. Görsel üzerinde iz bölgesi akım genişlikleri oklar ile gösterilmiştir. Silindire

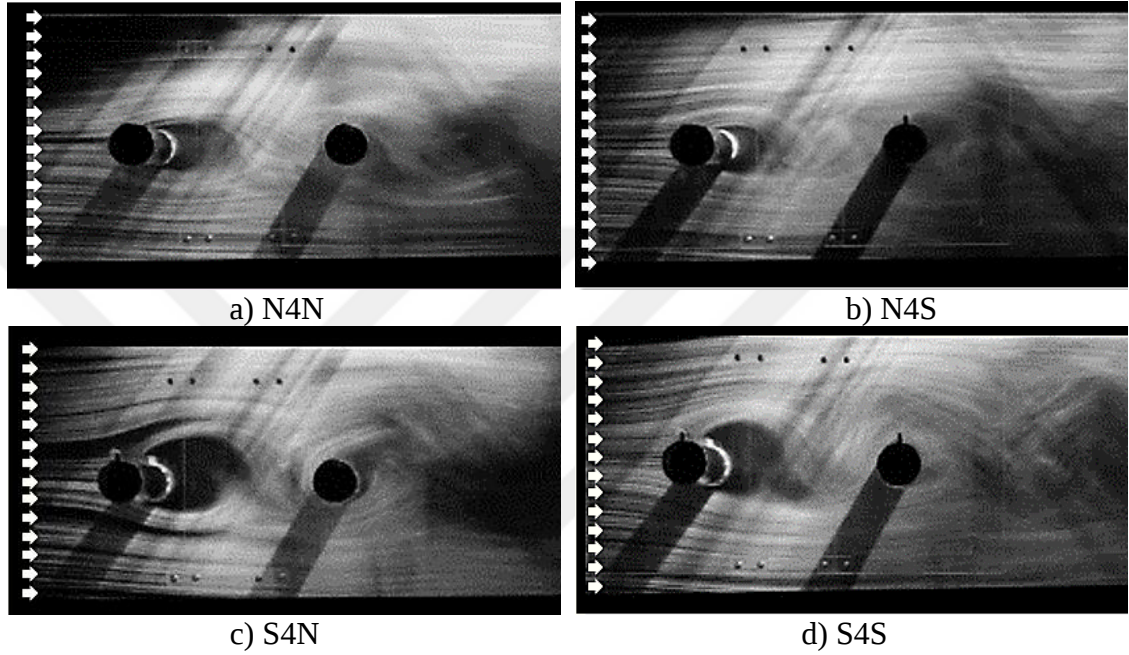
başlık eklenmesi durumunda iz bölgesinde ayrılmış akış nedeni ile düşük basınç alanı büyümektedir. Dolayısı ile başlıklı silindire gelen sürüklenme kuvveti başlıksız silindire gelen sürüklenme kuvvetinden daha büyük olmaktadır. Başlıksız silindirde silindir altında ve üstündeki saat yönü ve saat yönünün tersinde oluşan akış hareketleri daha çabuk birbiri ile buluşurken; başlıklı silindirin iz bölgesinde düşük basınç bölgesi hem yatayda hem de dikeyde geniş bir bölgeyi kapsadığından akış hareketleri birbiri ile buluşamamaktadır.



Şekil 3.2. $L/D=2$ durumunda elde edilen duman deneyi görüntüleri

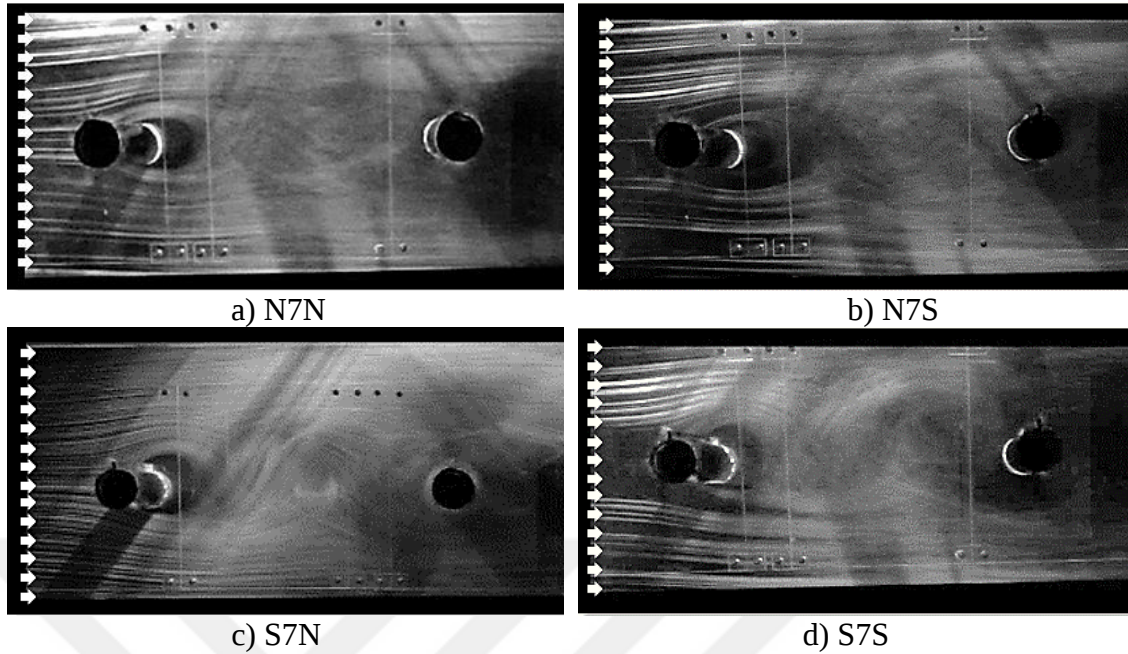
Şekil 3.2’de silindiler arası mesafe $L/D = 2$ olması durumunda N2N, N2S, S2N ve S2S durumlarında elde edilen duman deneyi görüntüleri verilmiştir. N2S durumunda, memba silindirinden kopan girdap mansap silindirinin başlığı ile etkileşim halinde olup, başlığa çarpan girdap parçalanarak daha küçük girdaplar oluşmasına ve mansap silindiri iz bölgesinde daha küçük girdaplar oluşmasına neden olmaktadır. Bu parçalanmış akış mansap silindirinin iz bölgesini genişletmekte ve bu genişlemenin etkisi ile sürüklenme kuvveti artmaktadır. İz bölgesinde oluşan bu küçük girdaplar mansap silindirine baskı uygulayarak kaldırma kuvvetinin negatif olarak büyümesine neden olmaktadır. Başlığın membada bulunan silindire eklenmesi durumunda yani S2N’de akış ayrılmaları artmakta ve iz bölgesi büyümektedir. Memba silindirindeki ayrılmış akış mansap silindirine de etki etmektedir. İz bölgesi büyüyerek girdapları artırdığından mansap silindirine etkiyen kaldırma katsayısı negatif olarak artmaktadır. S2N durumunda mansap silindirine bakıldığında memba silindirdeki ayrılmış akışa ait girdaplar, mansap silindirine pozitif

etki yaparak akışın tutunmasına neden olmuştur. Bu durum sürüklenme kuvvetinin düşmesine ve kaldırma kuvvetinin de düşmesine neden olmaktadır. $L/D = 2$ durumunda duman görüntüleri incelendiğinde mansap silindiri memba silindiri art izi bölgesi içinde kaldığı görülmektedir.



Şekil 3.3. $L/D=4$ durumunda elde edilen duman deneyi görüntüleri

Şekil 3.3'te silindiler arası mesafe $L/D = 4$ olması durumunda N4N, N4S, S4N ve S4S durumlarında elde edilen duman deneyi görüntüleri verilmiştir. Memba silindirlerinin başlıksız olması durumlarında (N4N ve N4S) memba silindirinin iz bölgesi; memba silindirlerinin başlıklı olması durumlarına (S4N ve S4S) göre daha dar olmaktadır. Bu durum memba silindirlerinin başlıksız o durumlarında sürüklenme kuvvetlerinin daha küçük olmasına neden olmaktadır. $L/D = 4$ durumunda mansap silindirleri memba silindirlerinin art izinin içinde kalmamakta ancak etkisinde olmaktadır. Duman görüntüleri incelendiğinde $L/D = 2$ durumundan farklı olarak her iki silindirde de girdap kopmalarının olduğu görülmektedir. S4N durumunda S2N durumuna benzer şekilde memba silindirdeki ayrılmış akışa ait girdaplar, mansap silindirinde akışın tutunmasına neden olmuştur. Bu durumda mansap silindirine etki eden sürüklenme kuvvetinin düşük olmasına kaldırma kuvvetinin ise büyük olmasına neden olmaktadır.



Şekil 3.4. $L/D=7$ durumunda elde edilen duman deneyi görüntüleri

Şekil 3.4'te silindiler arası mesafe $L/D = 7$ olması durumunda N7N, N7S, S7N ve S7S durumlarında elde edilen duman deneyi görüntüleri verilmiştir. N7N ve N7S durumlarına bakıldığında memba silindirinin art izi bölgesinde oluşan girdap kopmaları başlıksız tek silindir durumu olan N ile birbirine oldukça benzemektedir. Bu durumda memba silindirinin başlıksız olması halinde $L/D = 7$ için silindire etki eden sürüklenme kuvvetinin tek silindire etki eden kuvvet ile yakın olacağı yorumu yapılabilir. S7S ve S7N durumlarında ise art izi girdap görüntüleri S durumundan farklılık göstermektedir, dolayısı ile sürüklenme kuvvetleri de tek silindirden farklı olacaktır. N7N, N7S, S7N ve S7S durumlarında mansap silindirleri memba silindirinin art izi etkisinde olmakta ancak kendi girdap kopmaları da oluşmaktadır. Bu durumda bütün durumlar için $L/D = 2$ ve 4 'e göre oluşan sürüklenme kuvveti daha büyüktür.

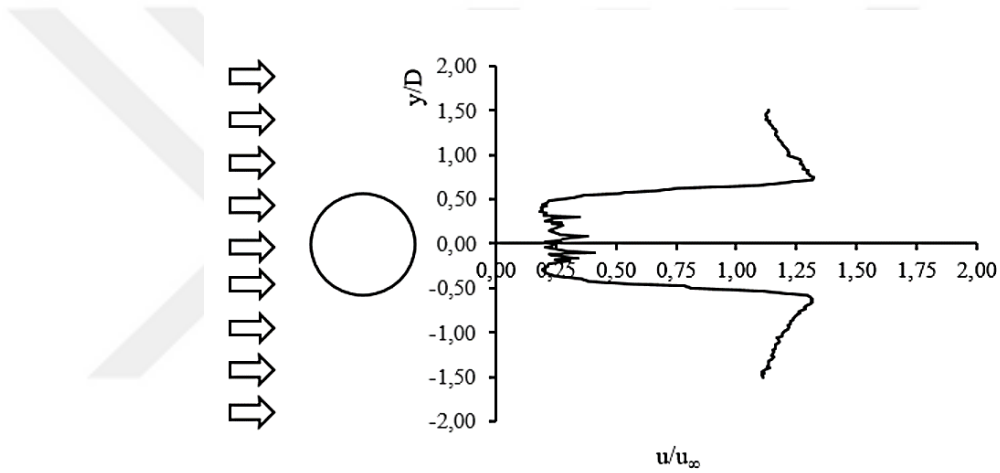
3.2.2 Sıcak Tel Anemometresi Deney Bulguları

Sıcak tel anemometresi ile yapılan hız ölçüm deneylerinde iki adet prob kullanılarak hem memba hem de mansap silindirinin art izinde $0,5D$ mesafede ölçüm alınmıştır. Yapılan hız ölçümü x ekseninde tek hat üzerinde yapılmış, y ekseninde ise silindirlerin $1D$ yukarısından başlanılarak silindirlerin $1D$ altına kadar 1 mm aralıklarla ölçüm alınmıştır. Ölçüm alınan her noktada saniyede 1000 veri alınarak 5 saniye ölçüm gerçekleştirilmiş böylece her noktada 5000 veri elde edilmiştir.

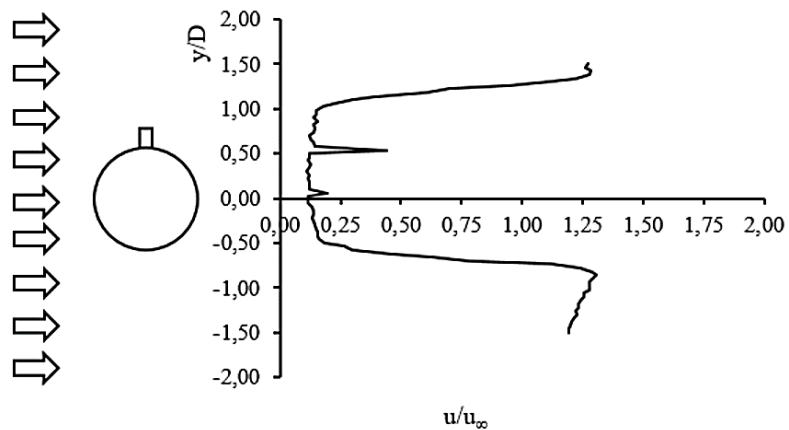
Elde edilen verilerin ortalamaları alınarak her noktada ortalama hız değeri elde edilmiş ve hız grafikleri çizilmiştir. Yine elde edilen veriler kullanılarak silindirlerin art izinde oluşan frekans değerleri incelenmiştir.

3.2.2.1. Hız Dağılımı Sonuçları

Sıcak tel anemometresi ile yapılan ölçümlerden elde edilen veriler ile hesaplanan hız grafikleri oluşturulurken y ekseninde ölçüm alınan mesafe silindir çapı olan D ile oranlanmış, x ekseninde ise ölçülen hızlar kanal hızı olan u_∞ ile oranlanmıştır. Böylece verilen grafikler boyutsuz forma getirilmiştir.



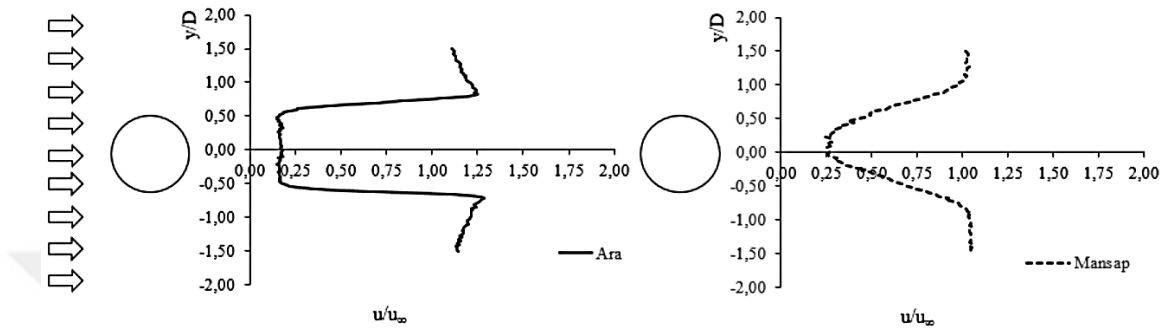
Şekil 3.5. N durumu hız dağılımı



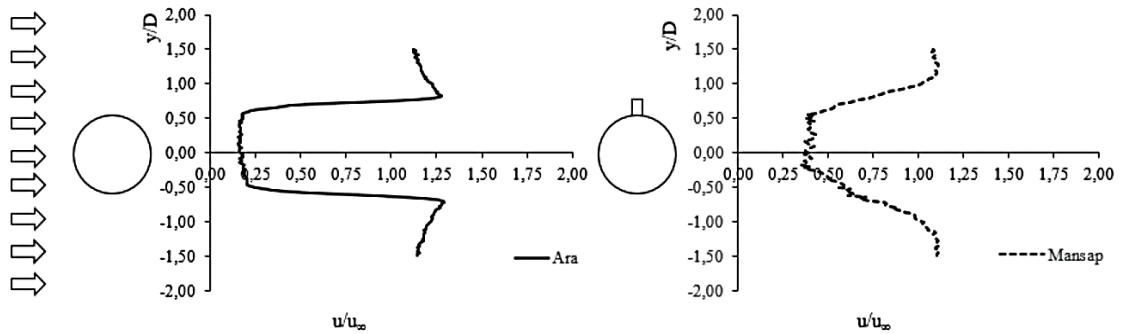
Şekil 3.6. S durumu hız dağılımı

Başlıklı ve başlıksız tek silindirlere ait hız grafikleri incelendiğinde S durumunda başlığın olduğu bölgede hızın ani olarak yükseldiği görülmektedir. S durumunda düşük hızlı ayrılmış akış bölgesinin N durumuna göre daha geniş olduğu görülmektedir. Akışın

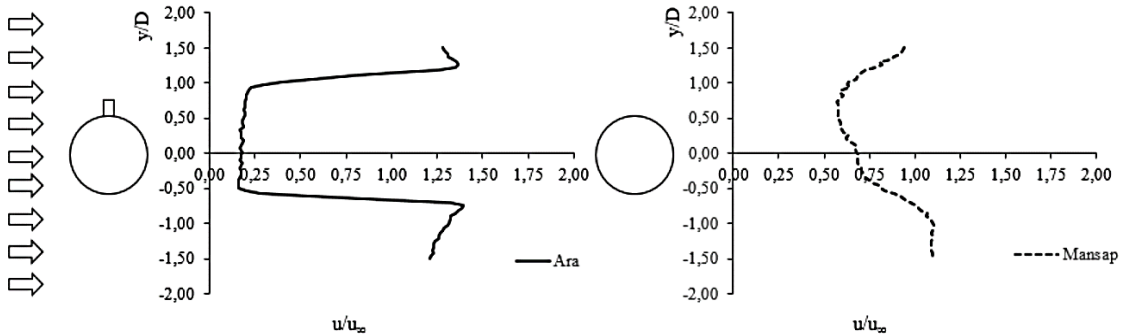
türbülanslı olduğu bölgede akışta daha büyük çalkantılar meydana gelir. Grafikler incelendiğinde N durumunda S durumuna göre akışın daha çalkantılı olduğu görülmektedir. Başlığın kullanılması silindir art izi bölgesinde türbülans yoğunluğunun azalmasına neden olmuştur. N durumunda ayrılmış akış alanı daha dar olduğundan atalet kuvvetlerinin fazla olduğu, akımın atalet kuvvetleri ile bastırıldığı söylenebilir.



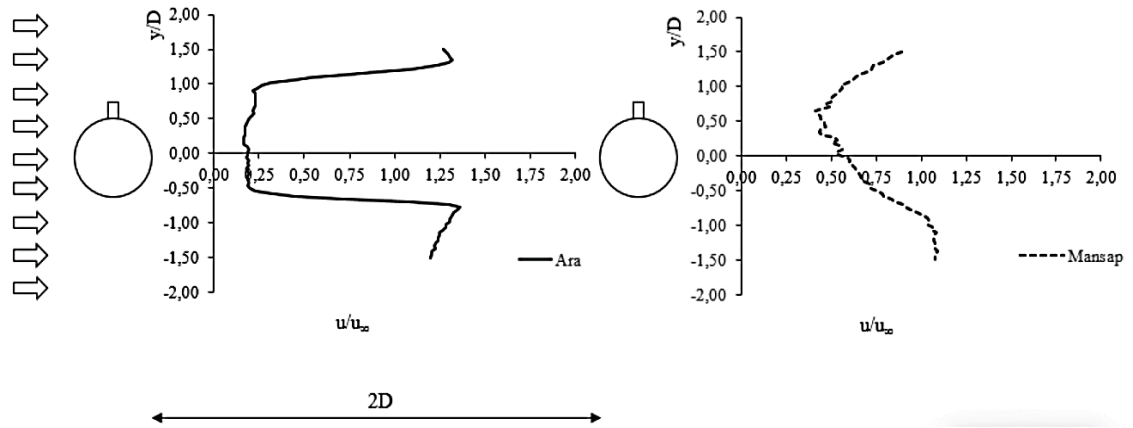
Şekil 3.7. N2N durumunda hız dağılımı



Şekil 3.8. N2S durumunda hız dağılımı

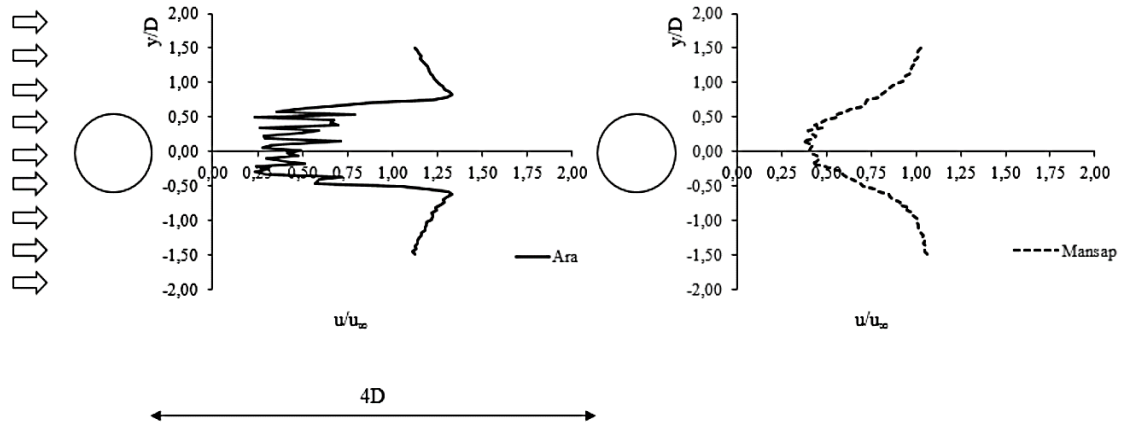


Şekil 3.9. S2N durumunda hız dağılımı

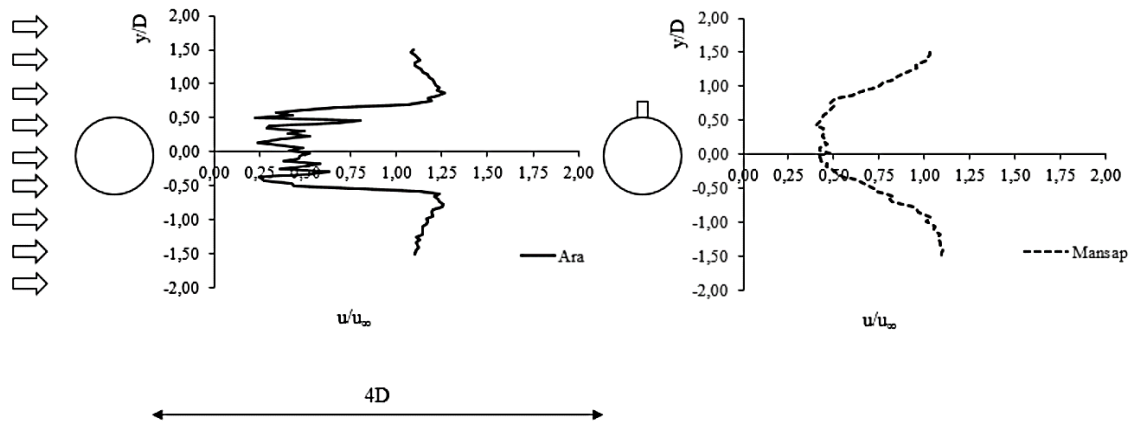


Şekil 3.10. S2S durumunda hız dağılımı

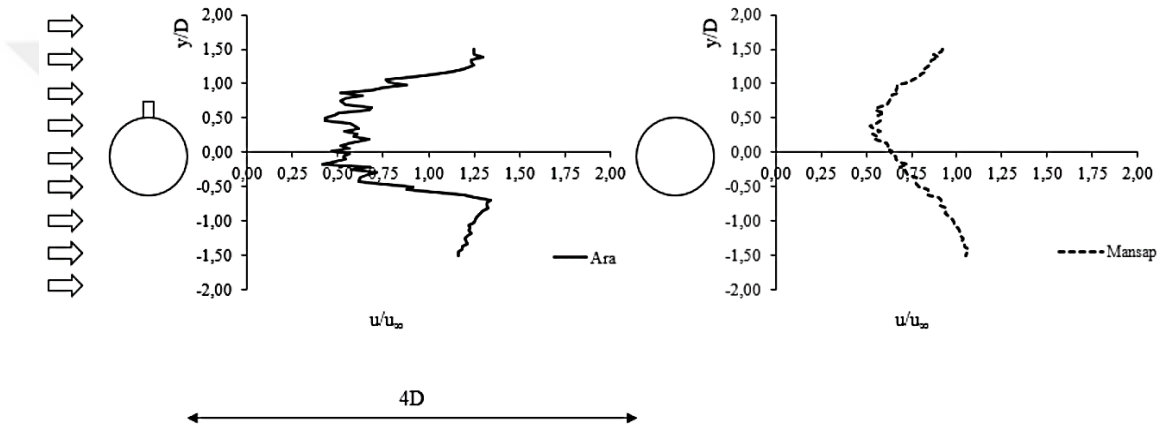
$L/D = 2$ olması durumuna ait hız grafikleri Şekil 3.7, 3.8, 3.9 ve 3.10'da verilmiştir. Grafiklerde memba silindirinden $0.5D$ kadar arkada alınan ölçümler ara olarak isimlendirilmiştir. N2N, N2S, S2N ve S2S durumlarının tamamında hız dağılımları çalkantısı yok denecek kadar azdır. Bu durumda ölçüm alınan noktalarda türbülans etkisinin de az olduğu söylenebilir. Özellikle mansap kısmında kalan silindirlere ait grafiklere bakıldığında $L/D = 2$ durumunda mansap silindirinin memba silindiri art izi içinde kalması nedeniyle türbülans etkisi görülmemektedir. N2N ve N2S durumlarının ara ve mansap bölge hız dağılımlarında düşük hızlı ayrılmış akış bölgeleri S2N ve S2S durumlarına göre daha dar olmaktadır. Başlık kullanımı ile atalet kuvvetleri düşmekte akım atalet kuvvetleri tarafından bastırılmamaktadır.



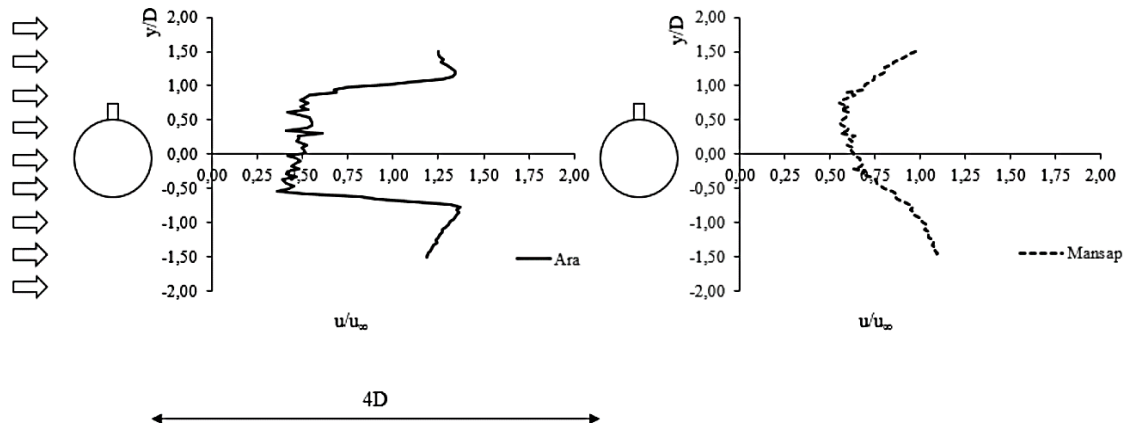
Şekil 3.11. N4N durumunda hız dağılımı



Şekil 3.12. N4S durumunda hız dağılımı



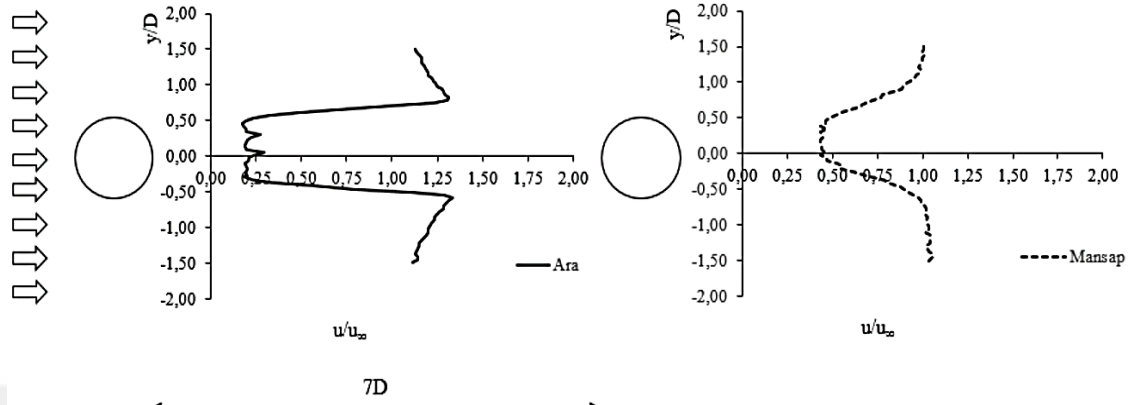
Şekil 3.13. S4N durumunda hız dağılımı



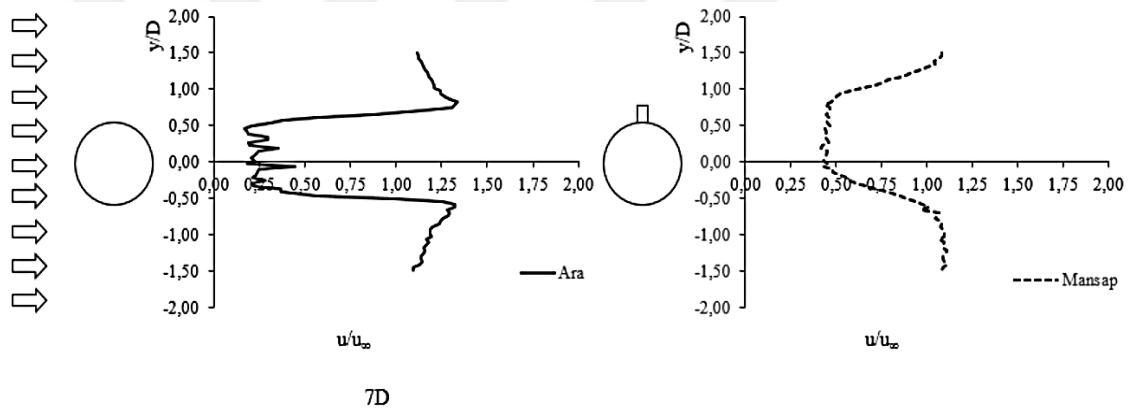
Şekil 3.14. S4S durumunda hız dağılımı

$L/D = 4$ olması durumuna ait hız grafikleri şekil 3.11, 3.12, 3.13 ve 3.14'de verilmiştir. N4N, N4S, S4N ve S4S durumlarının tamamında silindirler arası bölge olarak belirtilen grafiklerde hız dağılımları oldukça çalkantılıdır. Bu durumlarda mansap olarak belirtilen bölgede ise grafikler tamamen çalkantısız olmayıp küçük salınımlar şeklinde çalkantılıdır. Bu duruma mansap silindirinin memba silindirinden kopan girdaplardan etkilenmesi neden olmaktadır. NN durumunda her iki grafikte de düşük hız bölgesi dar

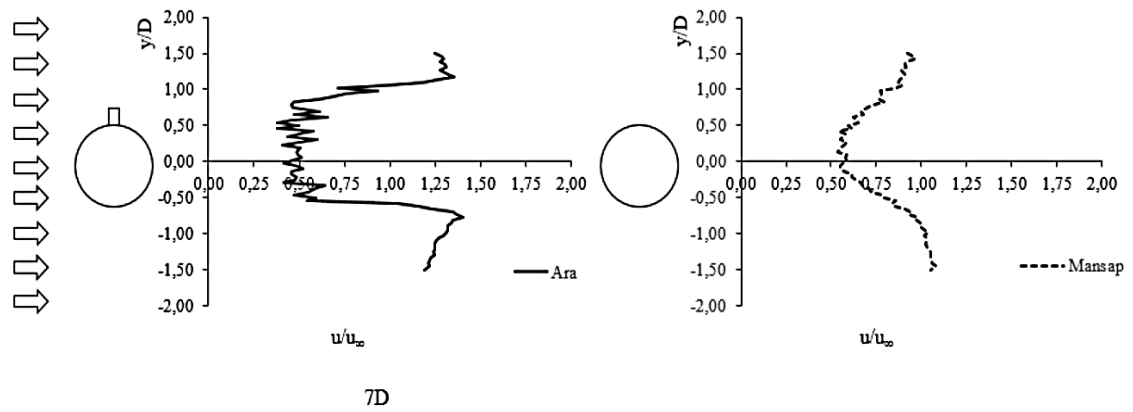
iken, başlık kullanımı ile düşük hız bölgesi genişliği artmış, en geniş düşük hız bölgesine sahip olan durum ise SS durumu olmuştur.



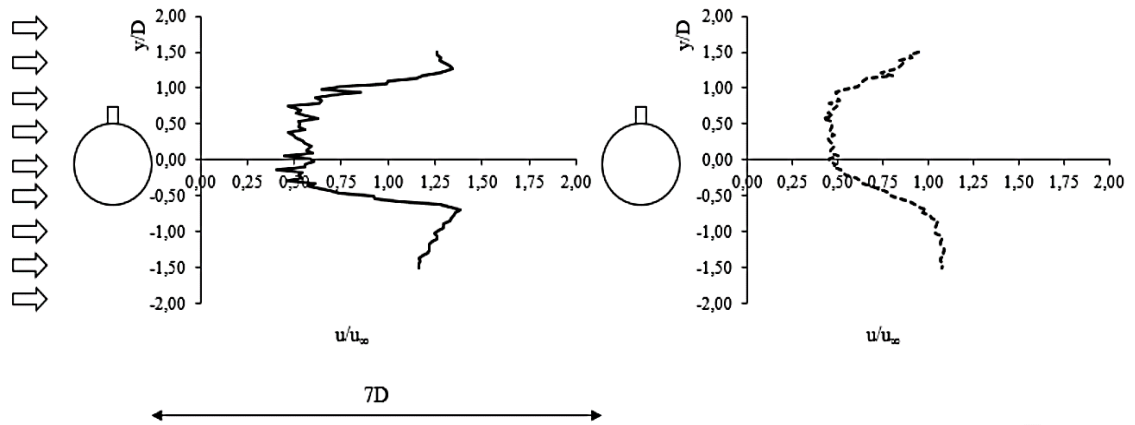
Şekil 3.15. N7N durumunda hız dağılımı



Şekil 3.16. N7S durumunda hız dağılımı



Şekil 3.17. S7N durumunda hız dağılımı



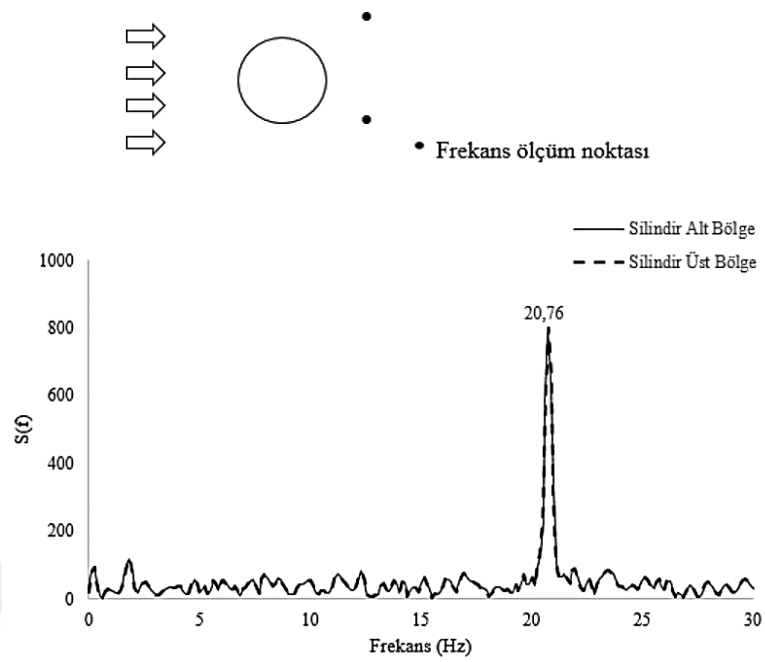
Şekil 3.18. S7S durumunda hız dağılımı

$L/D = 7$ olması durumuna ait hız grafikleri şekil 3.15, 3.16, 3.17 ve 3.18’de verilmiştir. N7N, N7S, S7N ve S7S durumlarının tamamında silindirler arası bölge olarak belirtilen grafiklerde hız dağılımları oldukça çalkantılıdır. Bu durumlarda mansap olarak belirtilen bölgede ise grafikler 2D boşluk oranına benzer şekilde çalkantısızdır. 7D boşluk oranında mansap silindiri daha az türbülansa maruz kalmaktadır. NN durumunda her iki grafikte de düşük hız bölgesi dar iken, başlık kullanımı ile düşük hız bölgesi genişliği artmış, en geniş düşük hız bölgesine sahip olan durum ise SS durumu olmuştur.

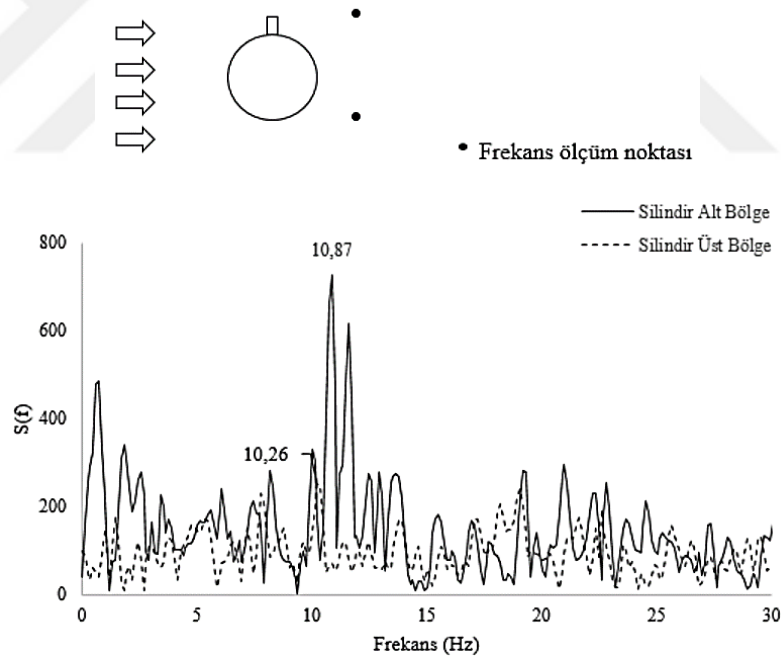
3.2.2.2 Girdap Kopma Frekansı Sonuçları

Frekans değerleri incelenirken, veriler spektral analiz yazılan bir kod ile değerlendirilmiş ve her bir noktada spektral analiz sonuçları grafiğe dönüştürülmüştür. Oluşturulan grafikler her noktada tek tek incelenerek girdap frekanslarından pik yapan değerler seçilmiştir.

Bir hat boyunca alınan hızlarla oluşturulan grafiklerden pik yapan değerler seçilirken başlık etkisini görebilmek için silindirin üst bölgesinde ve alt bölgesinde olacak şekilde iki pik seçimi yapılmıştır.



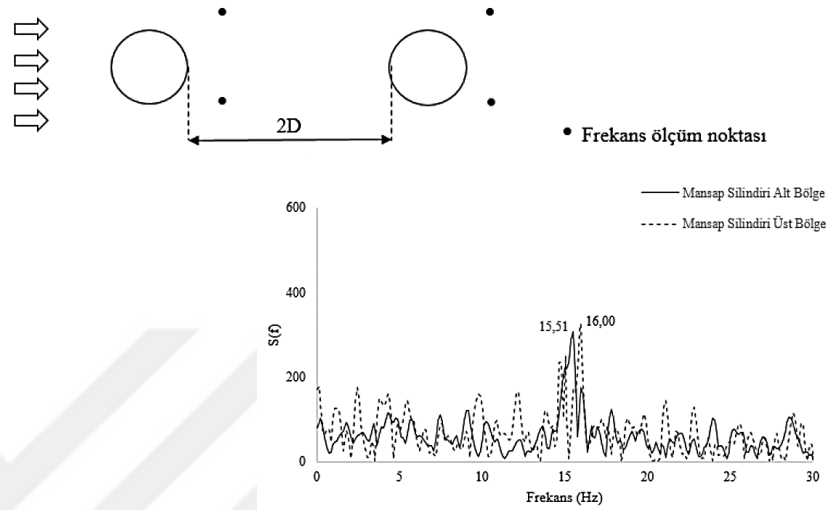
Şekil 3.19. N durumu spektral sonuçları



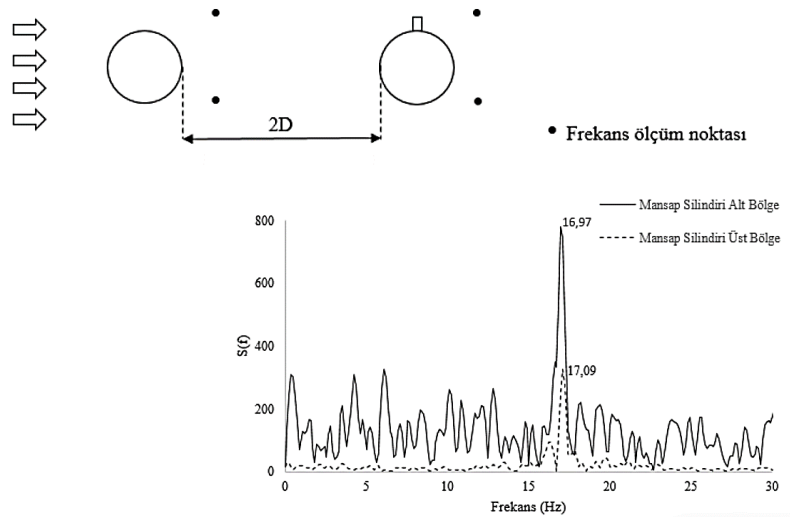
Şekil 3.20. S durumu spektral sonuçları

Şekil 3.19’da başlıksız tek silindir ve Şekil 3.20’de başlıklı tek silindire ait spektral grafikleri verilmiştir. N durumunda silindirin alt ve üst kısmında elde edilen pik değerlerine bakıldığında her ikisinin de aynı olduğu ve frekans değerinin 20,76 olduğu görülmektedir. S durumunda ise silindir alt bölgesinde frekans değeri 10,87 olurken silindir üst bölgesinde yani başlığın olduğu kısımda frekans değeri 10,26 olarak elde edilmiştir. Başlık kullanımının frekans değerini düşürdüğü hem S durumu alt ve üst

bölgeleri arasındaki farktan hem de N ve S durumu kendi içinde kıyaslandığında görülmektedir. Frekans değerlerinin düşük olması art izinde oluşan girdapların büyüdüğünü göstermektedir.



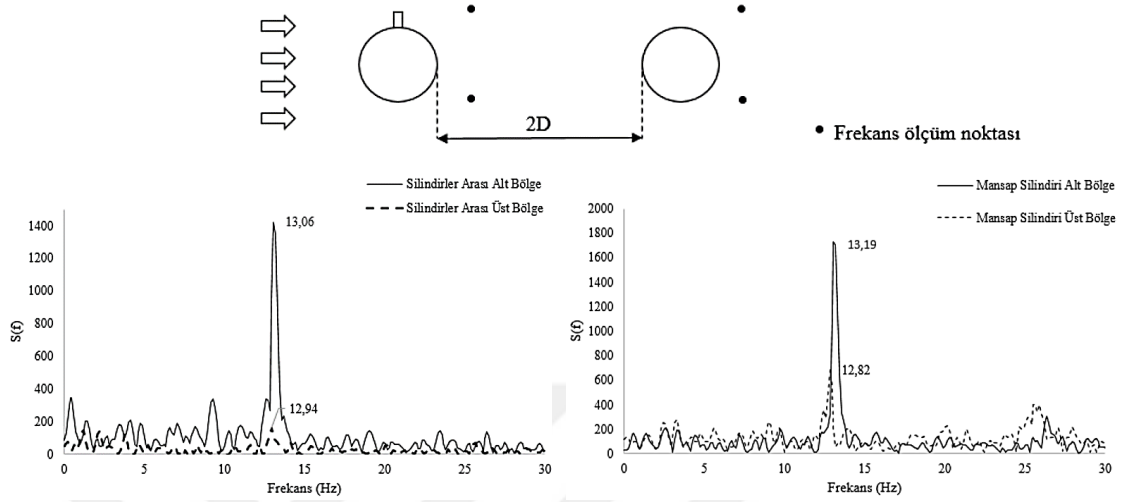
Şekil 3.21. N2N durumunda spektral sonuçları



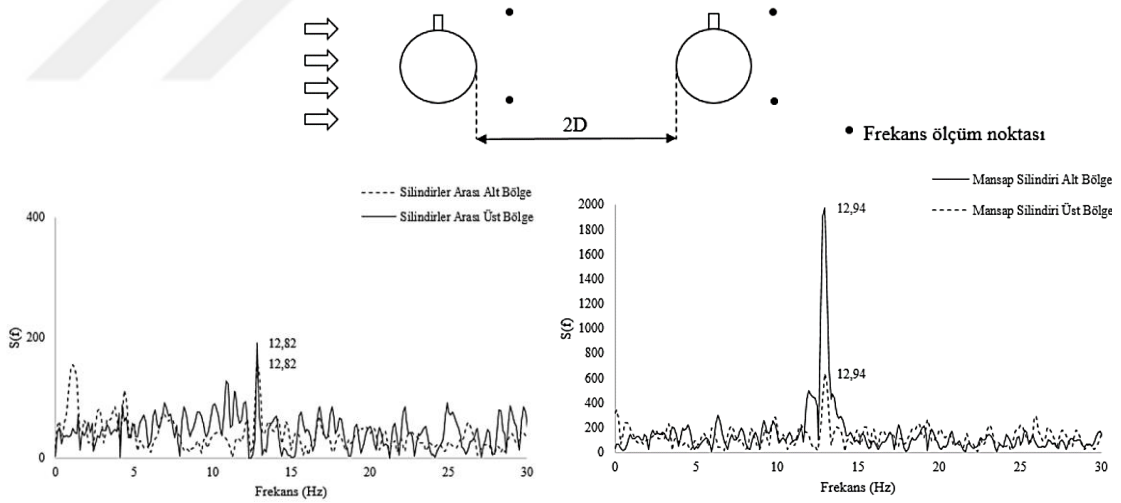
Şekil 3.22. N2S durumunda spektral sonuçları

Şekil 3.21'de N2N ve şekil 3.22'de N2S durumuna ait spektral analiz sonuçları verilmiştir. Spektral analiz grafikleri memba silindiri art izinde ve mansap silindiri art izinde düşeyde silindirin alt ve üst noktalarında elde edilmiş ve bu şekilde grafik haline getirilmiştir. N2N ve N2S durumlarının her ikisinde de memba silindiri art izi bölgesinde pik yapan bir grafik elde edilememiştir. $L/D = 2$ boşluk oranı için memba silindirinin

başlıksız olması durumunda mansap silindirinin başlığı önemli olmaksızın mansap silindiri memba silindirinin art izi içinde kalmaktadır.

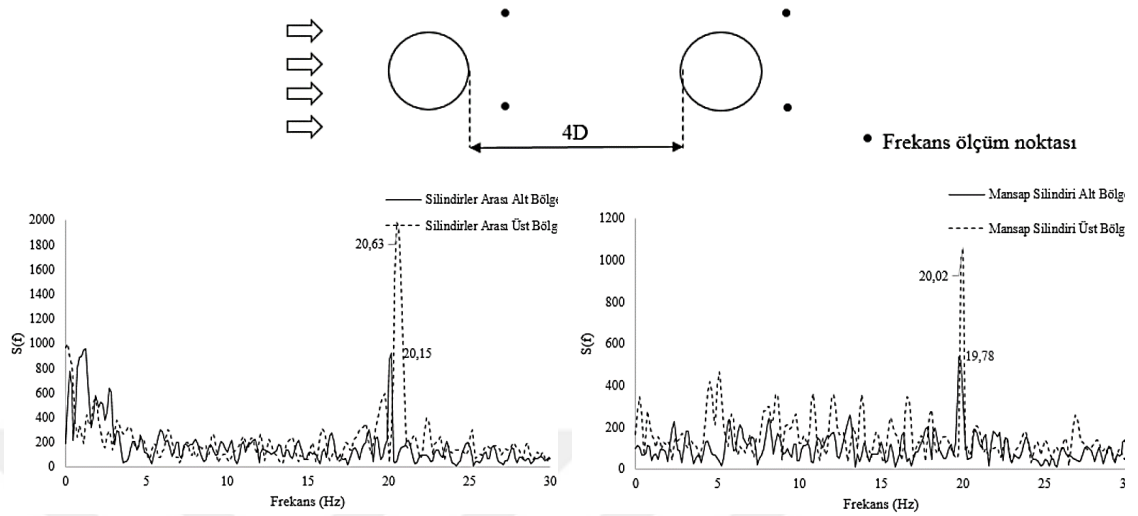


Şekil 3.23. S2N durumunda spektral sonuçları

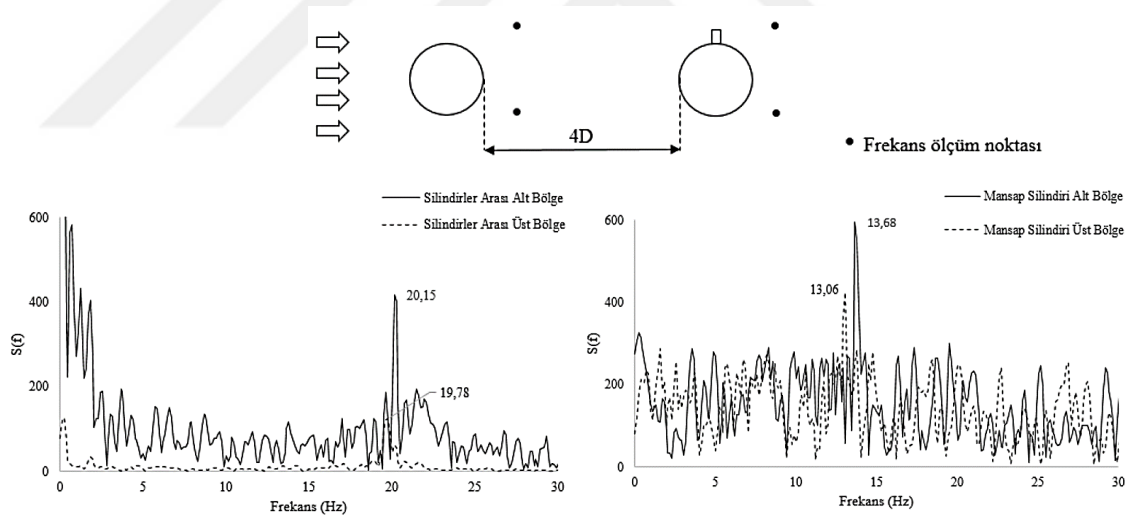


Şekil 3.24. S2S durumunda spektral sonuçları

Şekil 3.23'de S2N ve Şekil 3.24' de S2S durumlarına ait spektral grafikleri verilmiştir. $L/D = 2$ boşluk oranında memba silindiri başlıklı olduğunda memba silindiri art izinde spektral analiz ile pik veren grafikler elde edilmiştir. Ancak S2N ve S2S durumlarının ikisinde de memba ve mansap silindiri pik değerleri aynıdır. SN ve SS kombinasyonlarında memba silindirindeki başlık art izi bölgesini genişlettiğinden mansap silindiri tamamen bu bölgede kalmakta bu nedenle memba ve mansap art izi frekansları aynı olmaktadır.

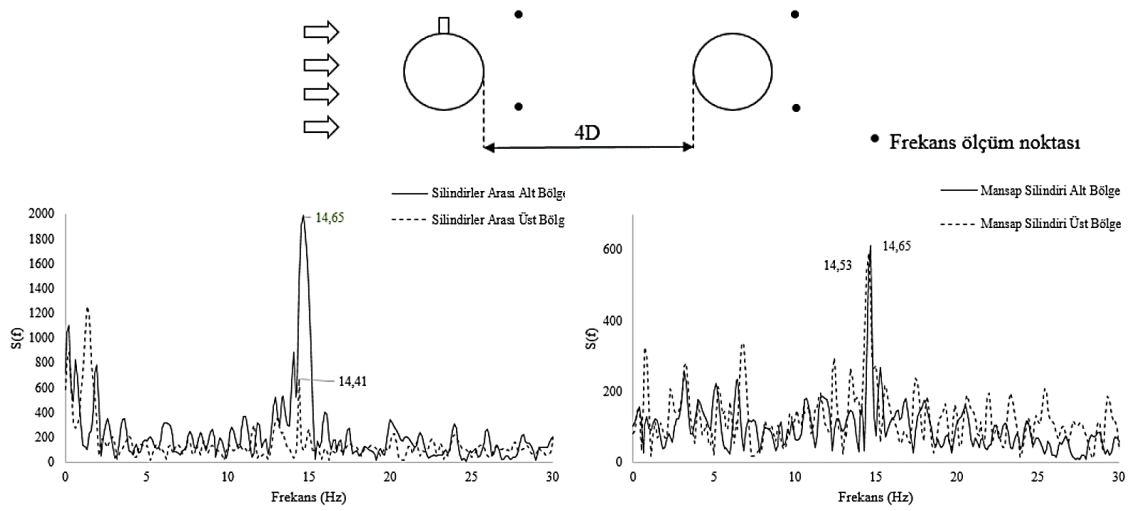


Şekil 3.25. N4N durumunda spektral sonuçları

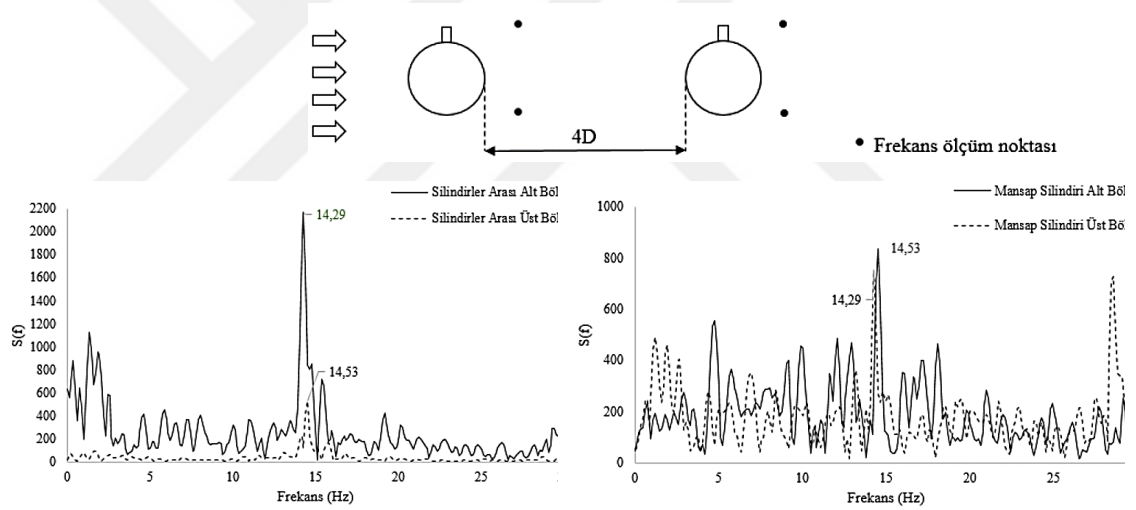


Şekil 3.26. N4S durumunda spektral sonuçları

Şekil 3.25'te N4N ve Şekil 3.26'da N4S durumlarına ait spektral analiz grafikleri verilmiştir. NN durumunda memba ve mansap silindirlerinin her ikisinde de N durumu ile aynı frekans değeri elde edilmiştir. NN durumunda $L/D = 4$ olması halinde her iki silindirin de kendine ait art izi ve girdap kopma frekansı oluşmaktadır. NS durumunda memba silindiri frekansı N durumu ile aynı çıkmaktadır. Mansap silindiri girdap kopma frekansı ise S durumundan büyük olmuştur. NS kombinasyonunda mansap silindirinin art izi memba silindirinden etkilenmektedir. Bu duruma mansap silindirine eklenen başlık neden olmaktadır.

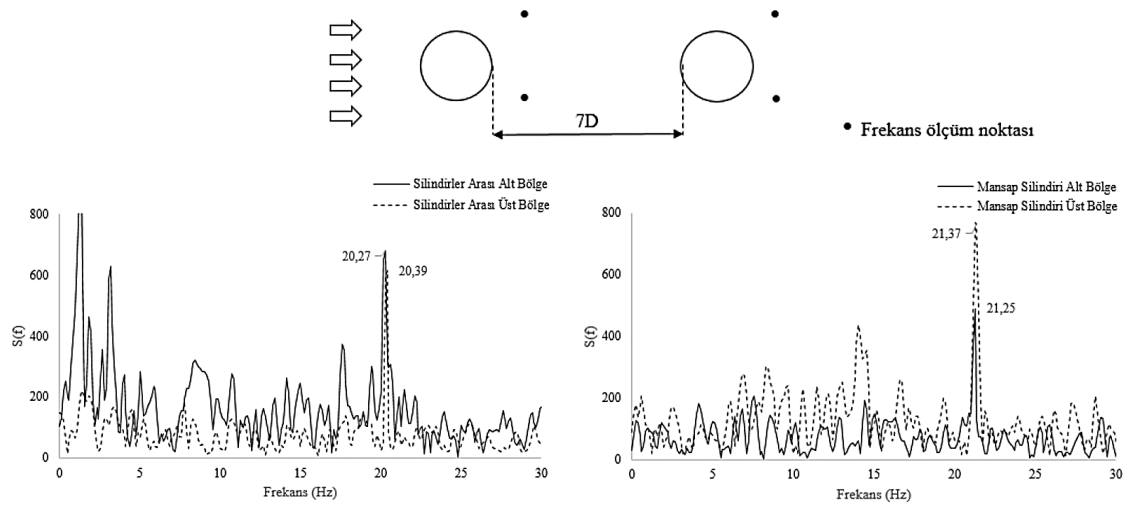


Şekil 3.27. S4N durumunda spektral sonuçları

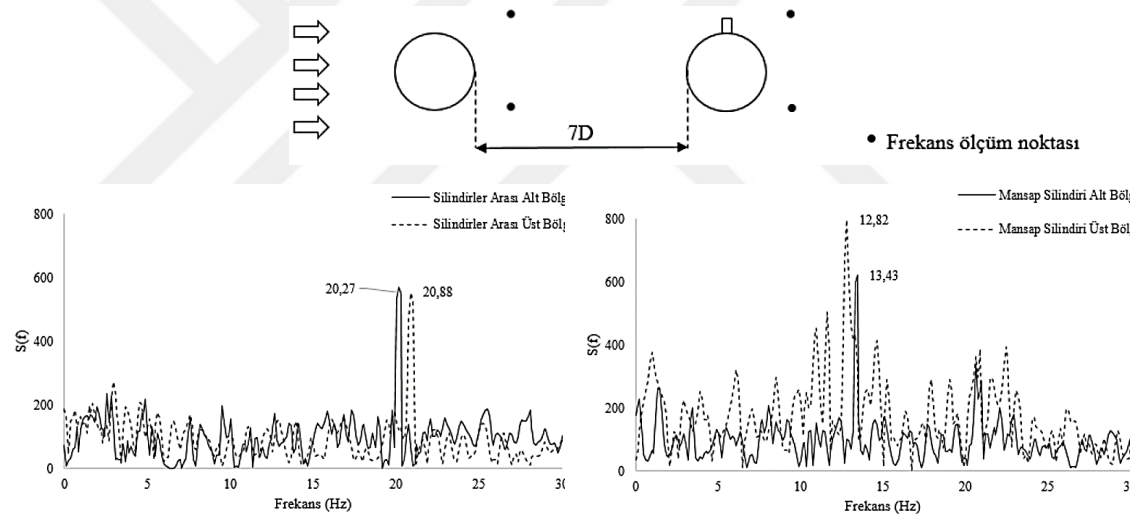


Şekil 3.28. S4S durumunda spektral sonuçları

Şekil 3.27’de S4N ve şekil 3.28’de S4S durumlarına ait spektral grafik sonuçları verilmiştir. Bu kombinasyonların tamamında memba ve mansap silindirlerine ait frekans değerleri çok küçük farklarla aynı elde edilmiştir. $L/D = 4$ boşluk oranında memba silindiri başlıklı olduğunda mansap silindiri başlıklı da olsa başlıksız da olsa memba silindirinin art izi içinde ve etkisinde olmaktadır.

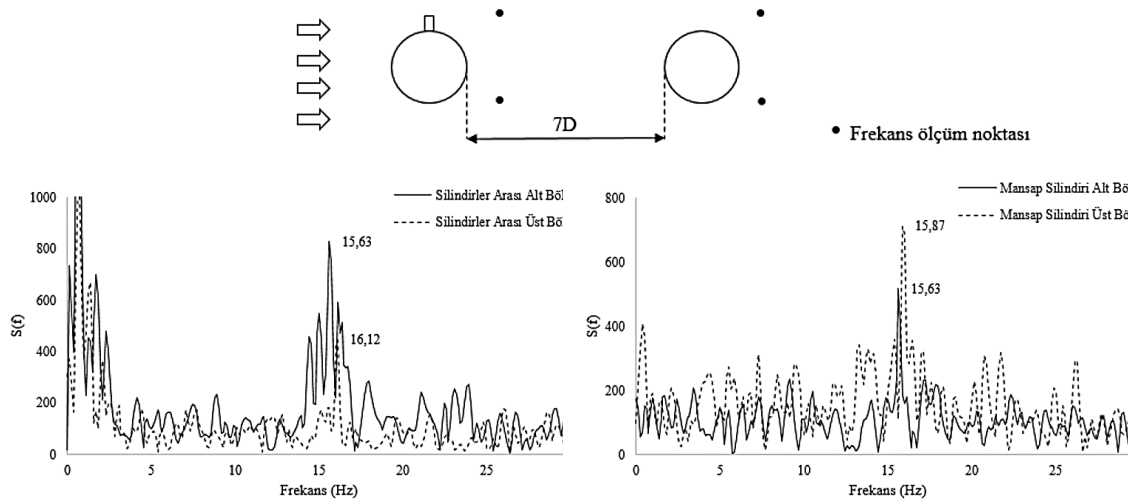


Şekil 3.29. N7N durumunda spektral sonuçları

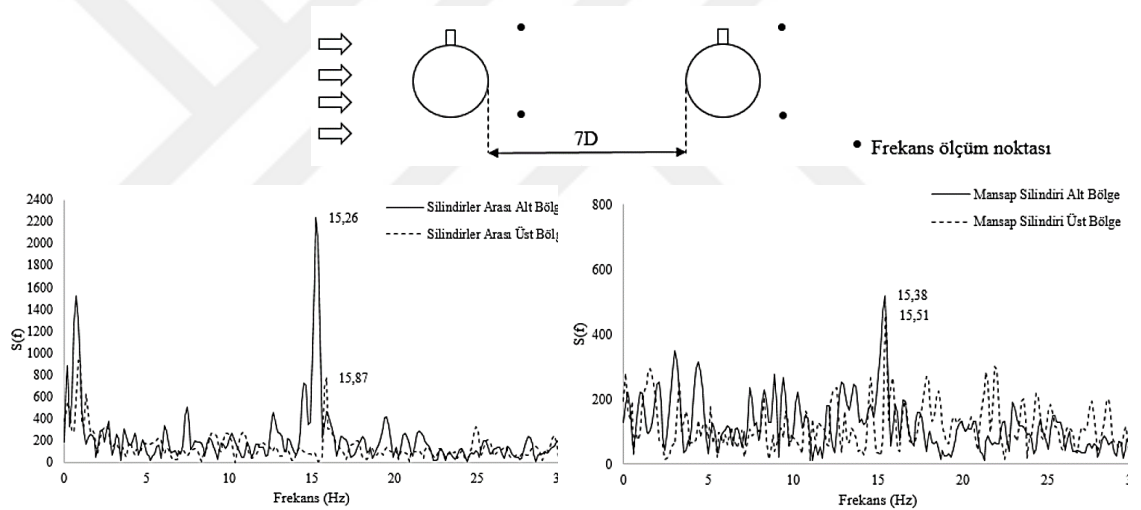


Şekil 3.30. N7S durumunda spektral sonuçları

Şekil 3.29'da N7N ve şekil 3.30'da N7S durumlarına ait spektral grafikleri verilmiştir. NN durumunda memba ve mansap silindirlerinin her ikisinde de N durumu ile aynı frekans değeri elde edilmiştir. NN durumunda $L/D = 7$ olması halinde her iki silindirin de kendine ait art izi ve girdap kopma frekansı oluşmaktadır. NS durumunda memba silindiri frekansı N durumu ile aynı çıkmaktadır. Mansap silindiri girdap kopma frekansı ise S durumundan büyük olmuştur. NS kombinasyonunda mansap silindirinin art izi memba silindirinden etkilenmektedir. Bu duruma mansap silindirine eklenen başlık neden olmaktadır.



Şekil 3.31. S7N durumunda spektral sonuçları



Şekil 3.32. S7S durumunda spektral sonuçları

Şekil 3.31’de S7N ve şekil 3.32’de S7S durumlarına ait spektral grafik sonuçları verilmiştir. Bu kombinasyonların tamamında memba ve mansap silindirlerine ait frekans değerleri çok küçük farklarla aynı elde edilmiştir. $L/D = 7$ boşluk oranında memba silindiri başlıklı olduğunda mansap silindiri başlıklı da olsa başlıksız da olsa memba silindirinin art izi içinde ve etkisinde olmaktadır.

Bütün boşluk oranlarında ve bütün başlık kombinasyonlarında elde edilen girdap kopma frekansları ile denklem (1.4) kullanılarak Strouhal sayıları hesaplanmıştır. Memba silindirlerinin art izinde elde edilen girdap kopma frekanslarından elde edilen Strouhal sayıları Tablo 3.1’de verilmiştir. Mansap silindirlerinin art izinde hesaplanan Strouhal sayıları ise Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Memba silindirleri art izi bölgesinde hesaplanan Strouhal sayıları

Memba Silindiri Art İzi Bölgesi				Başlık Durumu					
				NN	NS	SS	SN	N	S
	Boşluk Oranı (xD)	2D	Silindir Alt Bölge	-	-	0,15	0,16	-	-
			Silindir Üst Bölge	-	-	0,15	0,16	-	-
		4D	Silindir Alt Bölge	0,20	0,20	0,17	0,20	-	-
			Silindir Üst Bölge	0,21	0,20	0,17	0,17	-	-
		7D	Silindir Alt Bölge	0,20	0,20	0,18	0,19	-	-
			Silindir Üst Bölge	0,20	0,21	0,19	0,19	-	-
		Tek Silindir	Silindir Alt Bölge	-	-	-	-	0,21	0,13
			Silindir Üst Bölge	-	-	-	-	0,21	0,12

Tablo 3.2. Mansap silindirleri art izi bölgesinde hesaplanan Strouhal sayıları

Mansap Silindiri Art İzi Bölgesi				Başlık Durumu			
				NN	NS	SS	SN
	Boşluk Oranı (xD)	2D	Silindir Alt Bölge	0,16	0,20	0,16	0,13
			Silindir Üst Bölge	0,16	0,21	0,16	0,13
		4D	Silindir Alt Bölge	0,20	0,16	0,17	0,15
			Silindir Üst Bölge	0,20	0,16	0,17	0,15
		7D	Silindir Alt Bölge	0,21	0,16	0,18	0,16
			Silindir Üst Bölge	0,21	0,15	0,19	0,16

Tek başlıksız silindir için elde edilen Strouhal sayısı değeri 0,21 olarak elde edilmiştir. Elde edilen $St = 0,21$ değeri literatürde Nishimura ve Taniike tarafından yapılan deneysel çalışmadan elde edilen St sayısı ile uyumlu çıkmıştır [16]. Literatürde Schewe ve arkadaşları tarafından yan yana bulunan iki silindir etrafındaki akımı için yapılan deneysel bulgulara Strouhal sayısının da $L/D = 4$ olması durumunda tekli silindire benzer sonuç verirken; $L/D = 2,8$ olması durumunda düşük değerler aldığını bildirmişlerdir [43]. NN durumları için 4D ve 2D boşluk oranlarında elde edilen St sayıları incelendiğinde literatürde yapılan çıkarımı doğruladığı görülmektedir. Tek başlıklı silindir olan S durumunda elde edilen St sayısı, başlıklı silindirin membada ve mansapta olduğu durumların tamamında elde edilen St sayısından küçük olmuştur. SS durumunda tüm boşluk oranlarında St sayıları memba ve mansap silindirinde çok küçük farklarla aynı olarak elde edilmiştir. SN durumunda tüm boşluk oranlarında memba

silindiri St sayısı S durumundan büyük, mansap silindiri St sayıları ise N durumundan küçük olmuştur. ,

3.2.3. Aerodinamik Kuvvet Ölçüm Deney Bulguları

Aerodinamik kuvvet ölçüm deneylerinde saniyede 1000 veri alma özelliği ile 60 saniye boyunca ölçüm alınarak elde edilen 60000 veri sistem yazılımı aracılığı ile kuvvete dönüştürülmüş daha sonra bu veriler ile denklem (2.5) ve denklem (2.6) kullanılarak aerodinamik katsayılar elde edilmiştir. Sürüklenme katsayısı ve kaldırma katsayısı olan aerodinamik katsayılar; memba ve mansap silindirleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Tablo 3.3’de memba silindirlerine ait sürüklenme katsayısı değerleri, Tablo 3.4’de memba silindirlerine ait kaldırma katsayısı değerleri, Tablo 3.5’de mansap silindirlerine ait sürüklenme katsayısı değerleri ve Tablo 3.6’ da mansap silindirlerine ait kaldırma katsayısı değerleri verilmiştir.

Tablo 3.3. Memba silindirlerine ait sürüklenme katsayısı değerleri

Sürükleme Katsayısı (C _D)			Başlık Durumu					
			NN	NS	SS	SN	N	S
	Boşluk Oranı (xD)	2	1,29	1,30	1,83	1,87	-	-
		4	1,49	1,42	1,76	1,72	-	-
		7	1,81	1,64	2,51	2,40	-	-
	Tek Silindir	-	-	-	-	1,73	1,89	

Tablo 3.4. Memba silindirlerine ait kaldırma katsayısı değerleri

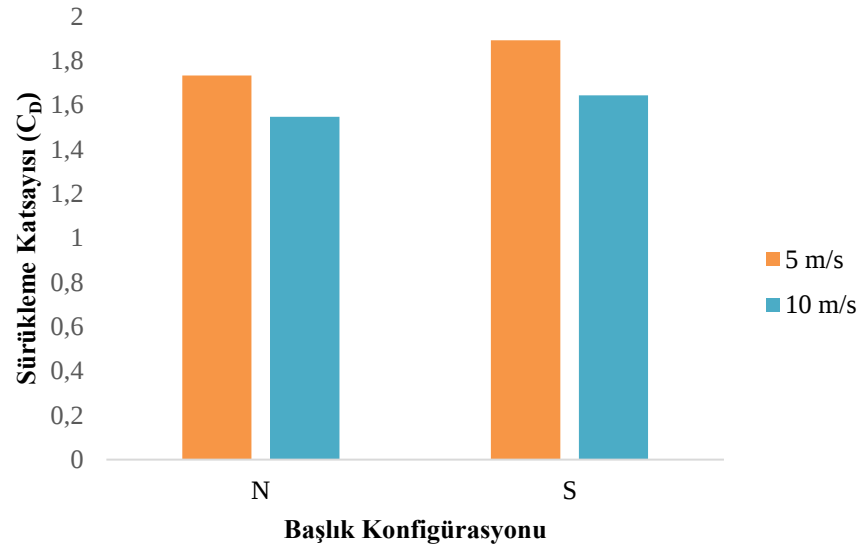
Kaldırma Katsayısı (C _L)			Başlık Durumu					
			NN	NS	SS	SN	N	S
	Boşluk Oranı (xD)	2	-0,04	-0,05	-0,83	-0,85	-	-
		4	-0,06	-0,06	-0,77	-0,78	-	-
		7	-0,08	-0,09	-1,55	-1,65	-	-
	Tek Silindir	-	-	-	-	-0,09	-1,49	

Tablo 3.5. Mansap silindirlerine ait sürüklenme katsayısı değerleri

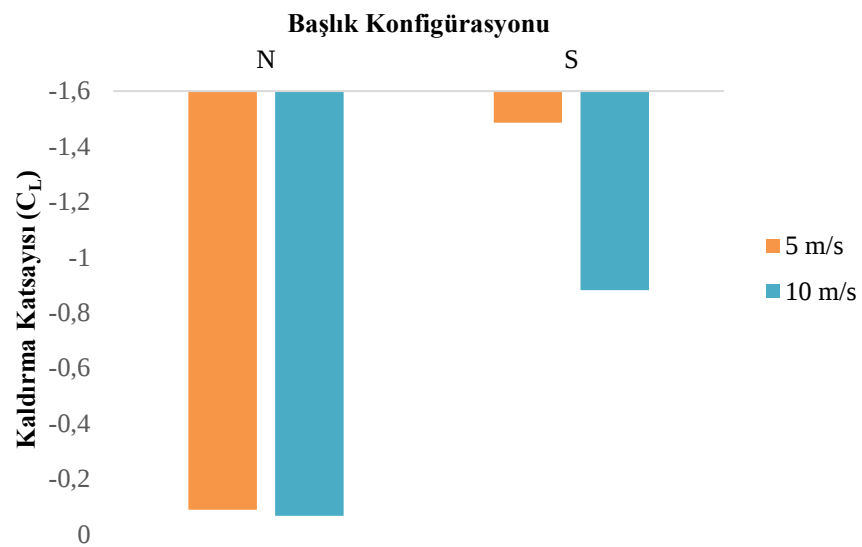
Sürükleme Katsayısı (C _D)			Başlık Durumu			
			NN	NS	SS	SN
	Boşluk Oranı (xD)	2	0,14	0,62	0,05	0,04
		4	0,90	1,28	0,87	0,80
7		1,10	1,66	1,23	0,88	

Tablo 3.6. Mansap silindirlerine ait kaldırma katsayısı değerleri

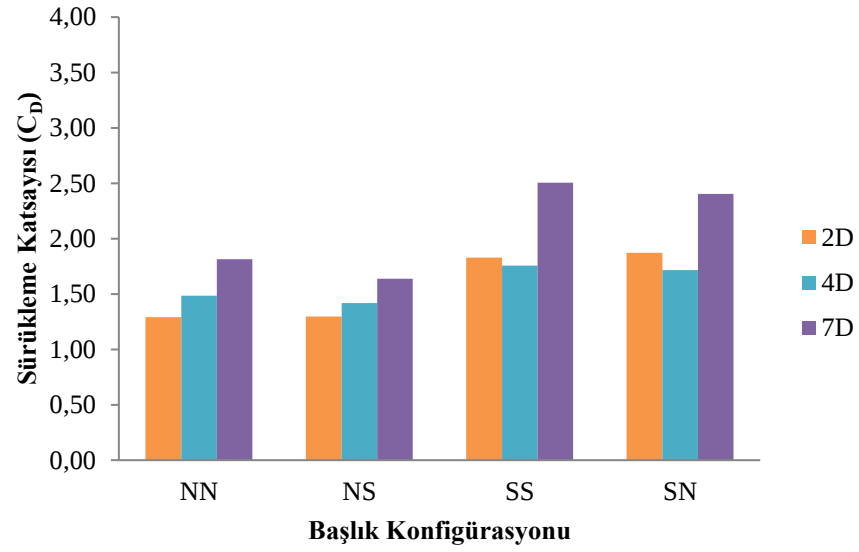
Kaldırma Katsayısı (C_L)			Başlık Durumu			
			NN	NS	SS	SN
	Boşluk Oranı (x/D)					
	2		-0,04	-0,75	0,09	0,20
	4		0,03	-1,17	-0,40	0,02
	7		-0,04	-1,38	-0,73	0,07



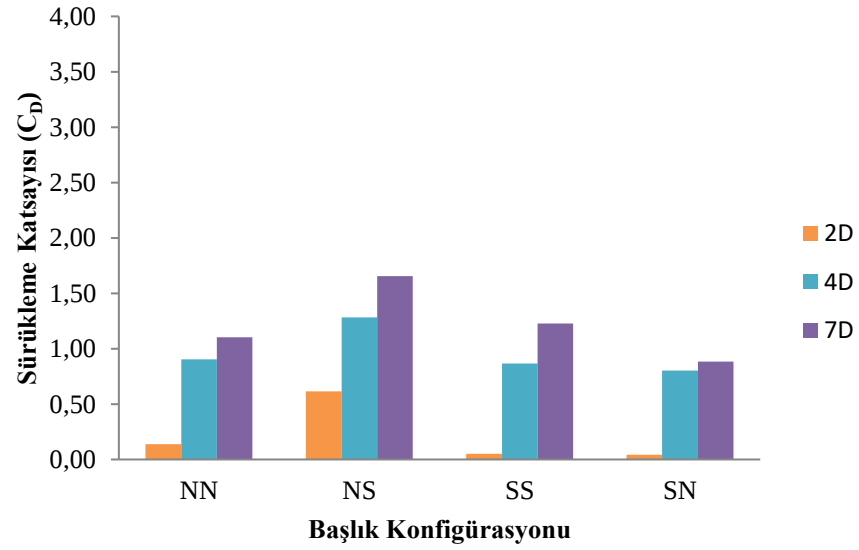
Şekil 3.33. Başlık eklenmesi durumunun sürükleme katsayısına etkisi



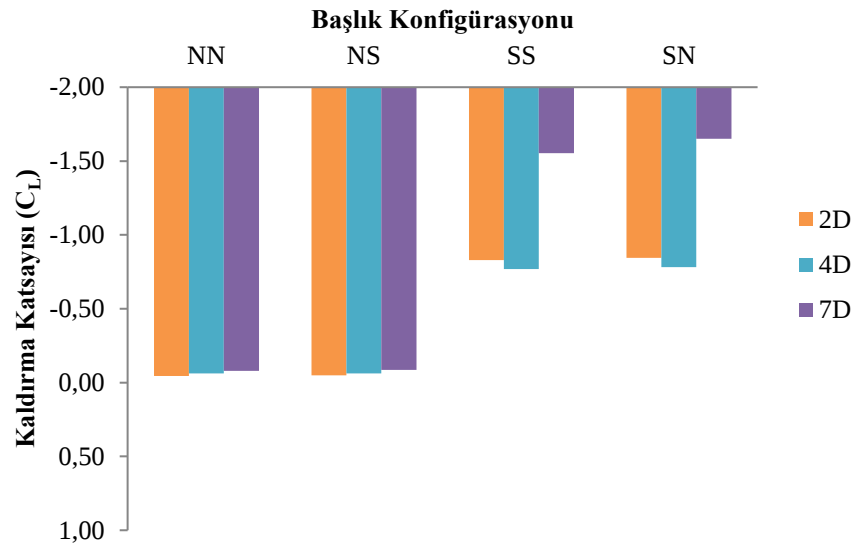
Şekil 3.34. Başlık eklenmesi durumunun kaldırma katsayısına etkisi



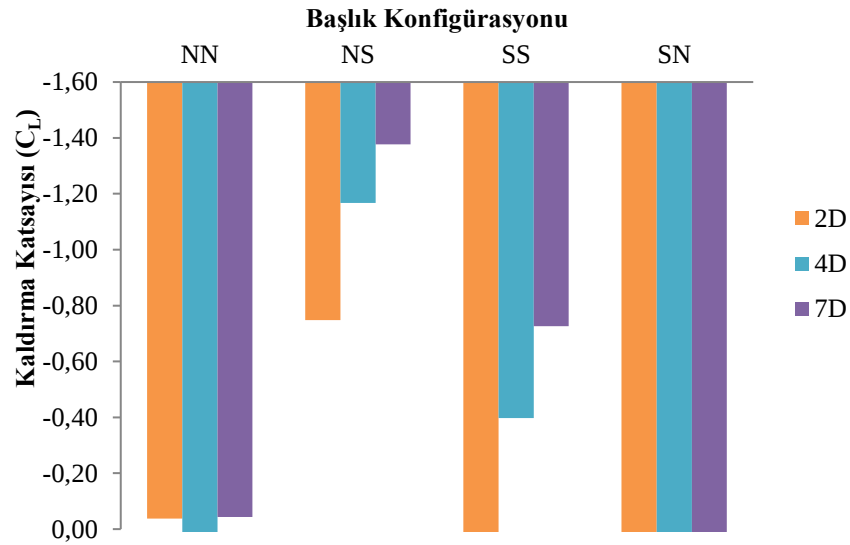
Şekil 3.35. Boşluk oranı ve başlık konfigürasyonunun memba silindirindeki sürüklenme katsayısına etkisi



Şekil 3.36. Boşluk oranı ve başlık konfigürasyonunun mansap silindirindeki sürüklenme katsayısına etkisi



Şekil 3.37. Boşluk oranı ve başlık konfigürasyonunun memba silindirindeki kaldırma katsayısına etkisi



Şekil 3.38. Boşluk oranı ve başlık konfigürasyonunun mansap silindirindeki kaldırma katsayısına etkisi

Başlıksız silindir (N) ile yapılan deney sonuçlarına göre elde edilen kaldırma katsayısı sıfıra çok yakın bir değer olarak ölçülmüştür.

Başlıksız silindir (N) ve başlıklı silindir (S) ile yapılan sürükleme katsayısı sonuçlarına bakıldığında; başlıklı silindirin sürükleme katsayısı başlıksız silindirin sürükleme katsayısından daha büyük elde edilmiştir. Başlık kullanımı ile silindire etki eden düşük basınç alanı büyüdüğünden sürükleme katsayısı büyümekte ve negatif kaldırma katsayısı

elde edilmektedir. Başlıklı silindir (S) ile yapılan deney sonuçlarına göre negatif kaldırma katsayısı ölçülmüştür. Şekil 3.33 ve şekil 3.34’de N ve S durumlarında oluşan sürüklenme ve kaldırma katsayılarının değişimi 5 m/s ve 10 m/s hız için verilmiştir. Hızın dolayısı ile de Reynolds sayısının değişmesi sürüklenme ve kaldırma katsayılarına başlık etkisini değiştirmemiştir.

Silindirlerin arka arkaya yerleştirilmesi durumlarında başlıksız silindire etki eden kaldırma katsayıları sıfıra çok yakın değerler almaktadır. Silindirin başlıksız olması durumunda silindire bir kaldırma kuvveti etki etmemektedir. Ancak S2N durumunda mansap silindirine 0,20 değerinde pozitif bir kaldırma katsayısı etki etmektedir. Bu durum yalnızca $L/D = 2D$ boşluk oranında görülmekte olup 4D ve 7D için aynı etki söz konusu değildir.

Silindirlerin arka arkaya yerleştirilmesi durumlarına bakıldığında NN ve NS durumlarında silindirler arası mesafe arttıkça hem memba silindirine etkiyen hem de mansap silindirine etkiyen sürüklenme katsayıları artış göstermiştir.

SS ve SN durumlarında silindirler arası mesafe arttıkça mansap silindirine etkiyen sürüklenme katsayısı artış gösterirken, memba silindirine etkiyen sürüklenme katsayısı $L/D = 4D$ boşluk oranında düşmüş $L/D = 7D$ boşluk oranında ise tekrar artmıştır. Aynı durum kaldırma katsayısı için de gözlenmiştir. Bu durumlar Şekil 3.35, 3.36, 3.37, 3.38’de görülmektedir.

$L/D = 2$ boşluk oranı için NN ve NS durumlarında memba silindirlerine etkiyen sürüklenme katsayısı değerleri aynı olurken, mansap silindirine etkiyen sürüklenme katsayısı NN durumunda 0,14 gibi oldukça düşük bir değer almış, NS durumunda ise mansap silindirine etkiyen sürüklenme katsayısı 0,62 olmuştur. N2N durumunda mansap silindiri memba silindirinin art izi içinde kaldığından etki eden sürüklenme kuvveti oldukça küçük olmuştur. S2S ve S2N durumlarında da benzer şekilde mansap silindirine etki eden sürüklenme kuvveti oldukça düşük olmuştur. 2D boşluk oranında mansap silindirinin memba silindirinin art izinde olduğu bu durumlar içinde söylenebilmektedir.

$L/D = 4$ boşluk oranı için NN ve NS memba silindirleri sürüklenme katsayıları kendi içinde; SS ve SN memba silindirleri sürüklenme katsayıları da kendi içinde yaklaşık olarak aynı olmuştur. 4D boşluk oranında mansap silindirine etki eden sürüklenme katsayıları

incelendiğinde 4D boşluk oranında mansap silindirinin memba silindirinden etkilendiği ancak art izi içinde kalmadığı görülmektedir.

NS durumunda tüm boşluk oranları için mansap silindirine etki eden sürüklenme katsayıları SS durumunda mansap silindirine etki eden sürüklenme katsayılarından büyük olmuştur. Membaina başlıksız silindir yerleştirilen başlıklı silindirde memba silindirinden kopan girdap mansaptaki silindir başlığı ile etkileşim halinde olarak akışın parçalanmasına bu da mansap silindirinin sürüklenme katsayısının artmasına sebep olmaktadır.

Şekil 3.37 ve 3.38’de başlıksız silindire etki eden kaldırma kuvvetlerinin silindir membada da olsa mansapta da olsa sıfıra çok yakın olduğu yani başlıksız durumda silindire kaldırma kuvveti etki etmediği görülmektedir. NS ve SS durumlarında mansap silindirine etki eden kaldırma kuvveti boşluk oranı arttıkça negatif olarak artmaktadır. SS ve SN durumlarında mansap silindirine etki eden kaldırma katsayısı 7D boşluk oranında en büyük negatif değerini almakta, 2D boşluk oranında etki eden katsayı ise 4D durumundan yine negatif olarak daha büyük olmaktadır.

3.2.4. Basınç Ölçüm Deney Bulguları

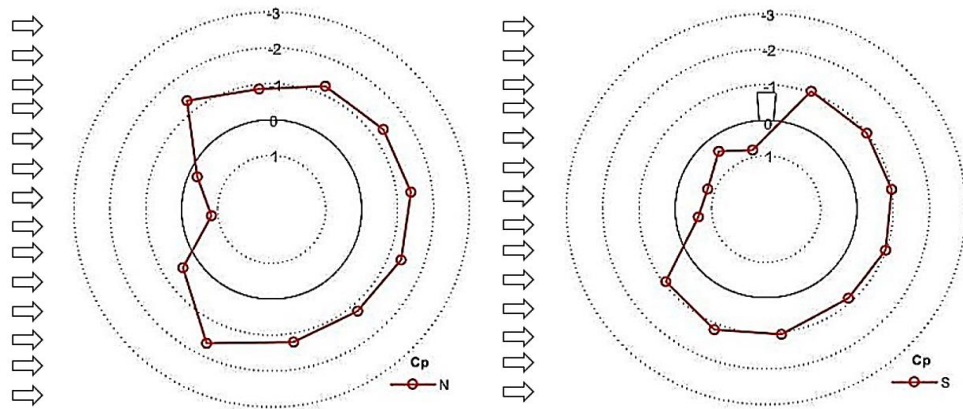
Basınç ölçümleri yapılırken her bir silindir üzerinde bulunan 12 ölçüm noktasından ölçüm yapılmıştır. Ölçüm alınan basınç noktalarının açıları tablo 3.7’de verilmiştir. Yapılan deneylerde alınan verilerin ortalamayı tam olarak yansıtması için saniyede 1000 veri alınarak 150 saniye ölçüm yapılmıştır. Her bir deney durumunda her bir basınç noktası için 150000 veri kaydedilmiş ve değerlerin ortalamaları alınarak boyutsuz basınç katsayısı (2.8) numaralı denklem ile hesaplanmıştır.

Tablo 3.7. Basınç ölçüm noktaları açıları

Başlıklı Memba (SxX)	Başlıklı Mansap (XxS)	Başlıksız Memba (NxX)	Başlıksız Mansap (XxN)
77,47°	79,81°	84,02°	80,94°
51,27°	52,64°	52,12°	49,25°
19,37°	24,34°	23,64°	22,08°
356,17°	354,91°	354,02°	352,64°
323,54°	325,47°	326,68°	324,34°
292,79°	296,04°	295,92°	298,30°
263,17°	266,60°	260,61°	264,34°

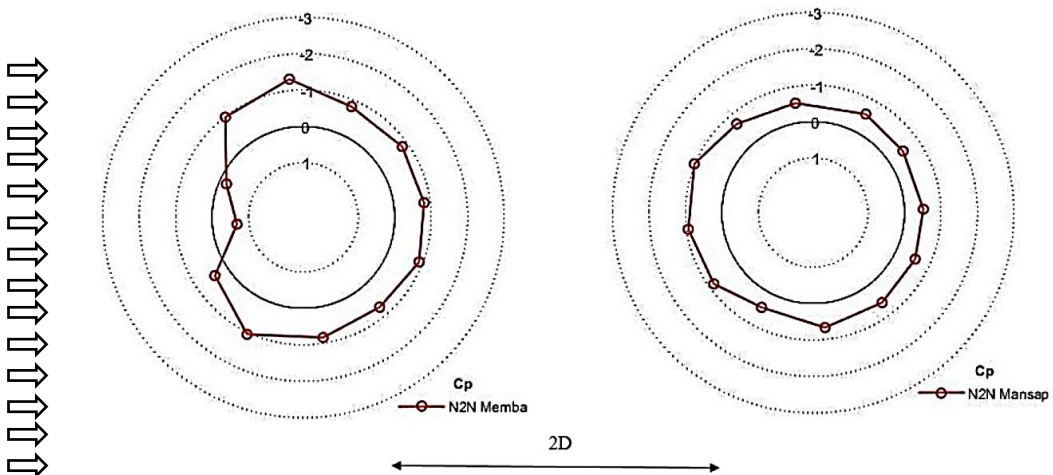
227,85°	234,91°	229,85°	232,64°
199,37°	204,34°	201,36°	204,34°
170,89°	176,04°	172,88°	178,30°
142,41°	145,47°	144,35°	145,47°
110,51°	117,17°	113,44°	118,30°

Hesaplanan basınç katsayıları daha anlaşılır olması açısından *MATLAB* programı ile silindirik koordinatlarda çizilerek görselleştirilmiştir.



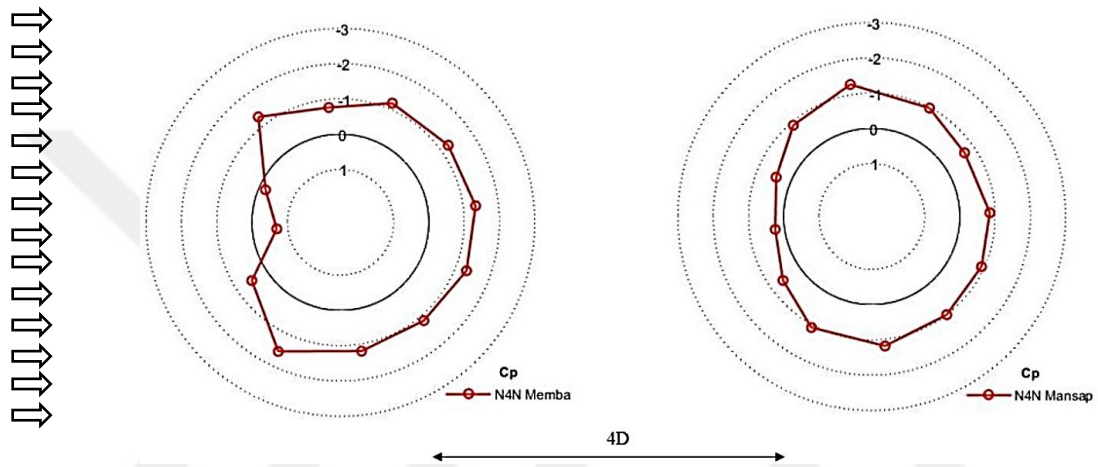
Şekil 3.39. Başlıklı ve başlıksız tek silindir için basınç katsayısı dağılımı

Şekil 3.39'da N ve S durumunu için basınç katsayısı dağılımı verilmiştir. Silindir üzerine başlık yerleştirilmesi silindir memba ve mansabındaki basınç dağılımını büyük oranda değiştirmektedir. Başlıklı silindir için silindir mansabında basınç azalmıştır, silindir membaında ise basınç artmıştır. Bu durum sürüklenme kuvvetinin değiştiğinin bir göstergesidir. Silindirin üst yüzeyindeki basınç büyük ölçüde azalmıştır, bu durum kaldırma kuvvetinin değiştiğini göstermektedir.

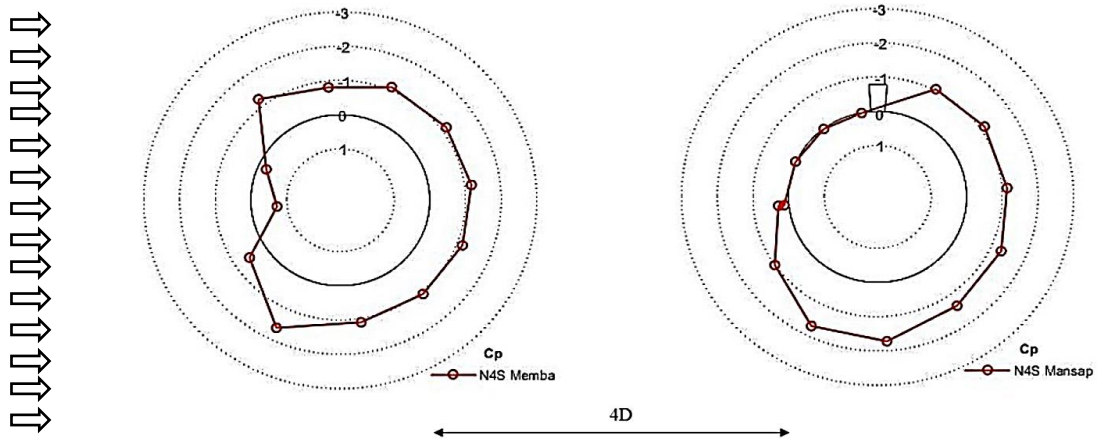


Şekil 3.40. N2N durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı

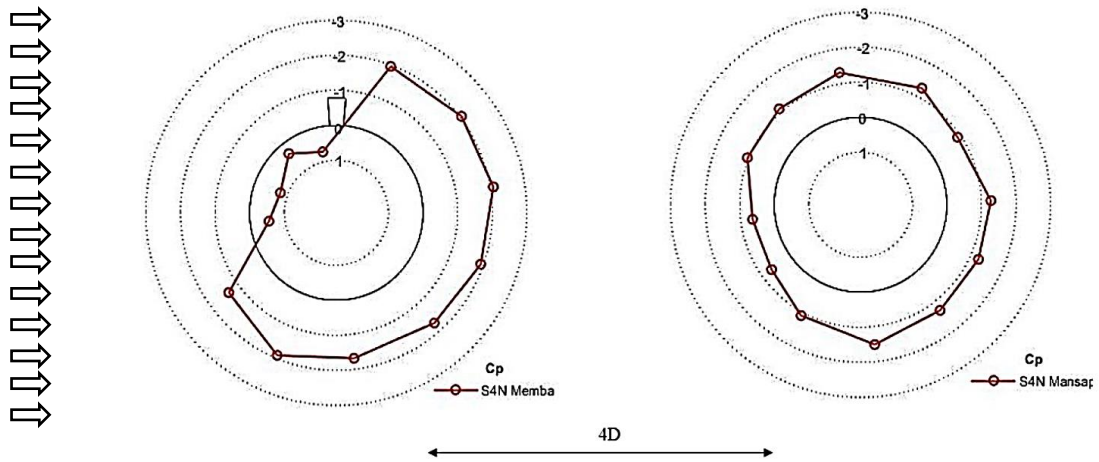
$L/D = 2$ durumu için elde edilen sonuçlar şekil 3.40, 3.41, 3.42 ve 3.43’de verilmiştir. Bu durumda mansap silindirleri tüm durumlar için daima negatif basınç etkisinde kalmaktadır. Mansap silindirinin başlıklı olması durumunda oluşan negatif basınç alanı büyümüştür. Memba silindirleri dikkate alındığında ise NN ve NS durumları N durumu ile, SN ve SS durumları ise S durumu ile benzer trendde dağılım göstermişlerdir. SS durumunda mansap silindiri negatif basınç alanı NS durumu mansap silindiri negatif basınç alanından büyük olmuştur.



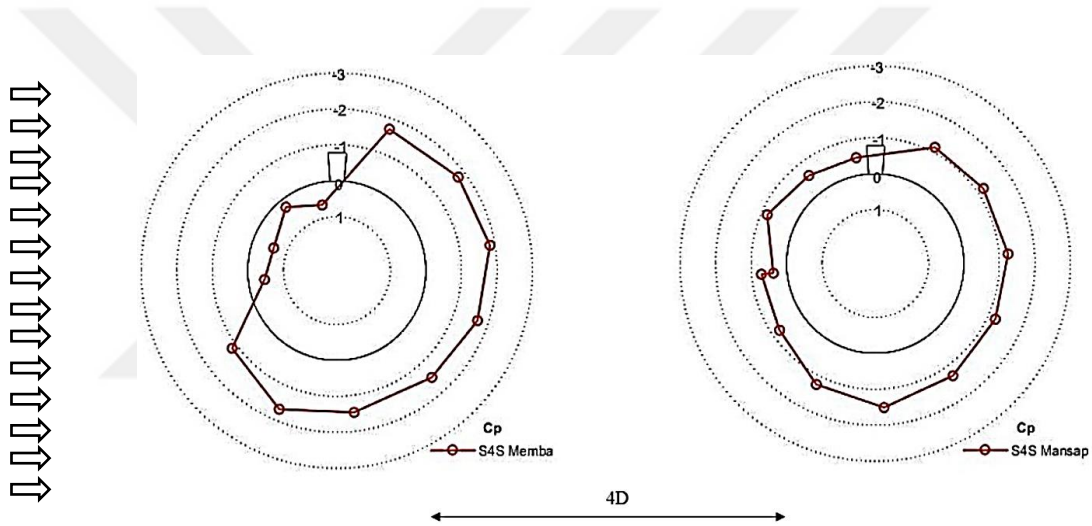
Şekil 3.44. N4N durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı



Şekil 3.45. N4S durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı

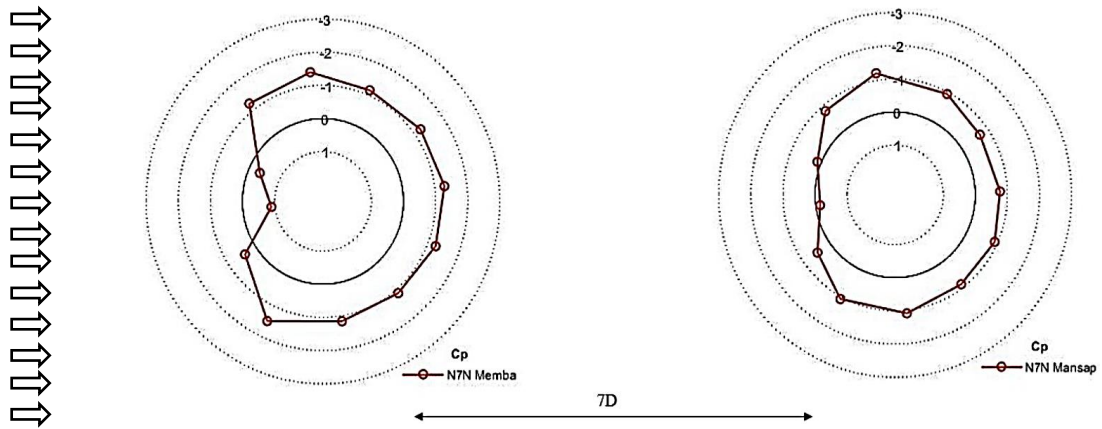


Şekil 3.46. S4N durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı

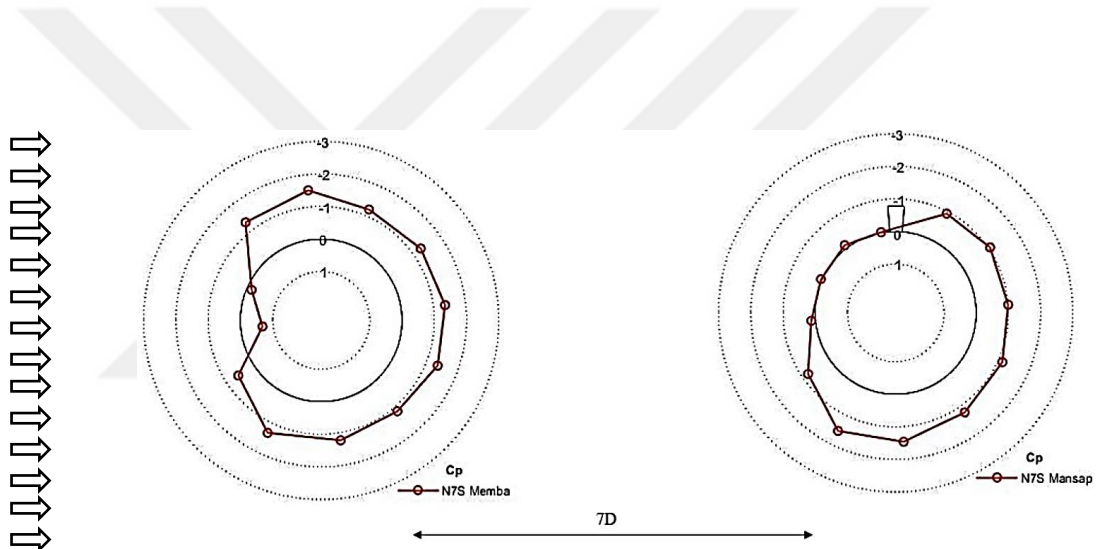


Şekil 3.47. S4S durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı

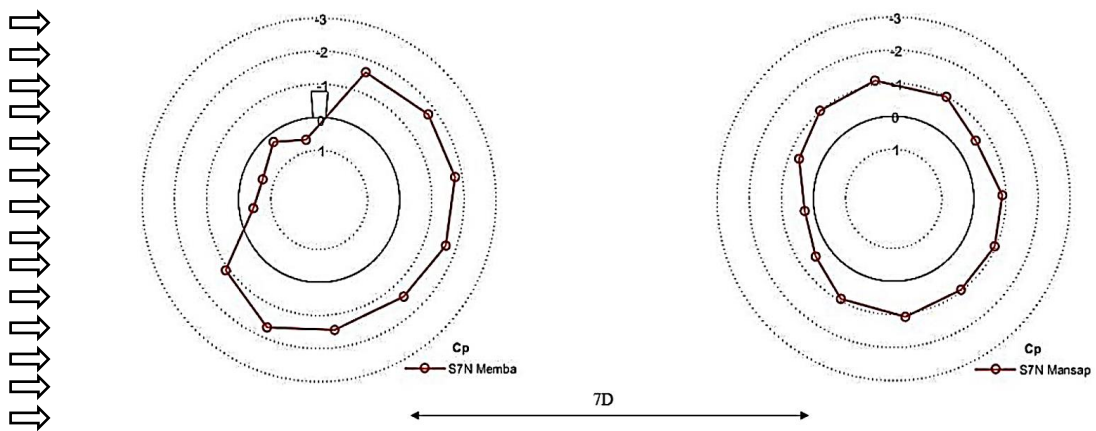
$L/D = 4$ durumu için elde edilen sonuçlar şekil 3.44, 3.45, 3.46 ve 3.47’de verilmiştir. Bu durumda mansap silindirleri tüm durumlar için daima negatif basınç etkisinde kalmaktadır. N4S durumunda mansap silindiri basınç dağılımında silindirin membaında basınç katsayısı sıfır olmuştur. S4N ve S4S durumlarında memba silindirinde oluşan basınç alanı S2N ve S2S durumlarında memba silindirinde oluşan basınç alanından daha büyük olmuştur. S4N durumunda mansap silindirinde oluşan negatif basınç alanı S4S durumunda oluşan negatif basınç alanından daha büyük olarak gözlenmiştir. Memba silindirinde başlık olması durumunda mansapta bulunan başlıksız silindir basınç alanı negatif olarak büyümektedir.



Şekil 3.48. N7N durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı



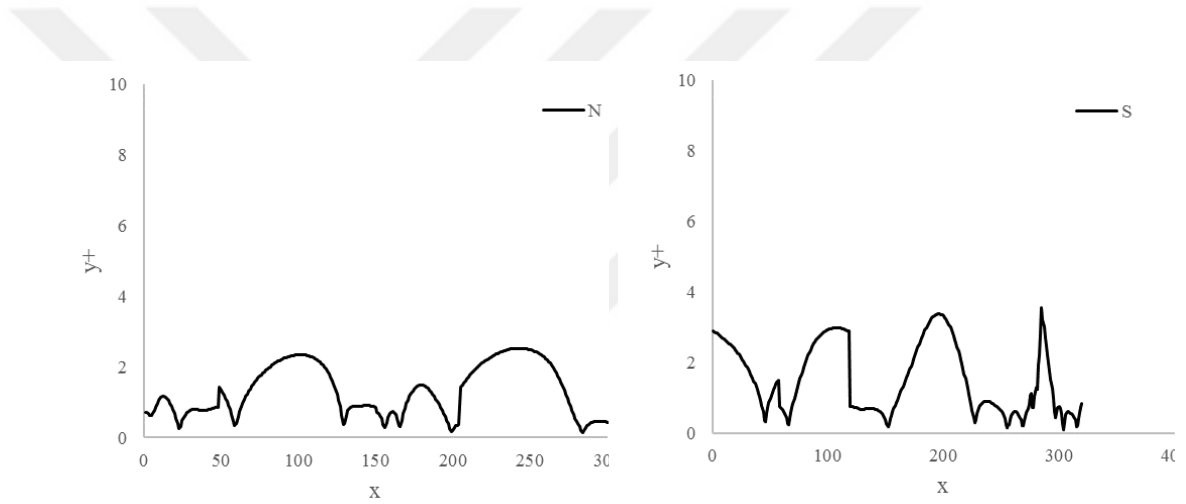
Şekil 3.49. N7S durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı



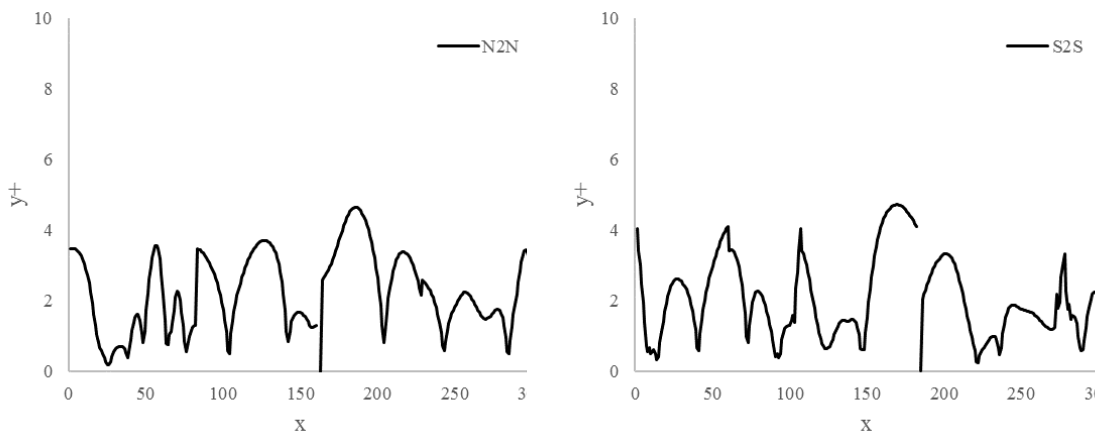
Şekil 3.50. S7N durumunda memba ve mansap silindirleri basınç katsayısı dağılımı

3.3.1 Yakın Duvar İşlemler

Türbülanslı akış problemlerini çözerken uygun yakın duvar modellerinin önemi büyüktür. Tüm duvar boyunca uygulanabilen türbülans modellerine ilaveten kabul edilen başka bir modelleme yaklaşımı duvar fonksiyonlarıdır. Duvar fonksiyonlarının kullanım amacı, ilk çözüm ağı noktası ile akış değişkenlerini ilişkilendirmek ve böylece aradaki çözme gereğini ortadan kaldırmak olduğundan, bu noktada y^+ 'nın alt sınırının viskoz alt tabaka içine düşmesi için dikkatli tayin edilmesi gereklidir. Buna göre $y^+ < 10$ olması durumunu sağlayacak şekilde ağ yapısı oluşturulması çözüm ağının yeterli olduğunu gösterir.



Şekil 3.52. N ve S durumlarına ait y^+ değeri grafiği



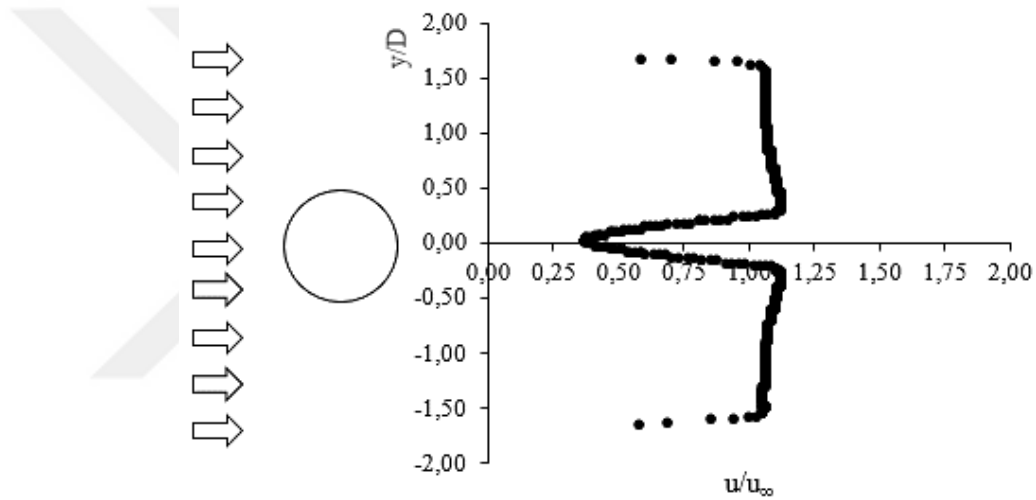
Şekil 3.53. N2N ve S2S durumlarına ait y^+ değeri grafiği

Şekil 3.52'de N ve S durumlarına ait y^+ grafikleri ve şekil 3.53'de N2N ve S2S durumlarına ait y^+ grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde tüm durumlar için

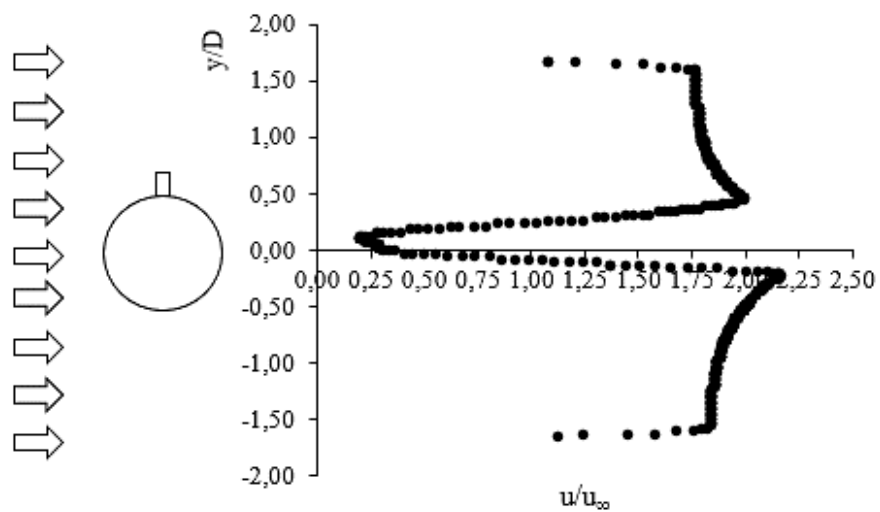
$y^+ < 10$ şartının sağlandığı görülmektedir. Bu durumda oluşturulan ağ yapısı silindir civarını çözmek için yeterlidir.

3.3.2 Sayısal Analiz Hız Dağılımı Sonuçları

Sayısal analiz sonucunda deneysel koşullarla aynı şekilde silindirlerin 0,5D kadar art izinden ortalama hız verileri alınmıştır. Elde edilen ortalama hız verileri kanal hızına oranlanarak boyutsuz hale getirilmiştir. Mesafeler ise boyutsuzlaştırmak amacıyla D silindir çapına oranlanmıştır.



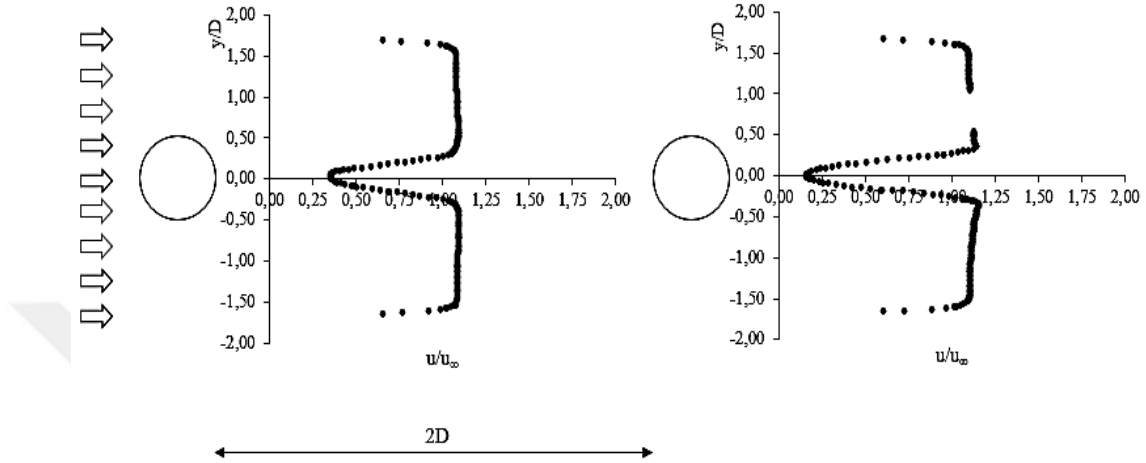
Şekil 3.54. N durumu sayısal analiz hız dağılımı



Şekil 3.55. S durumu sayısal analiz hız dağılımı

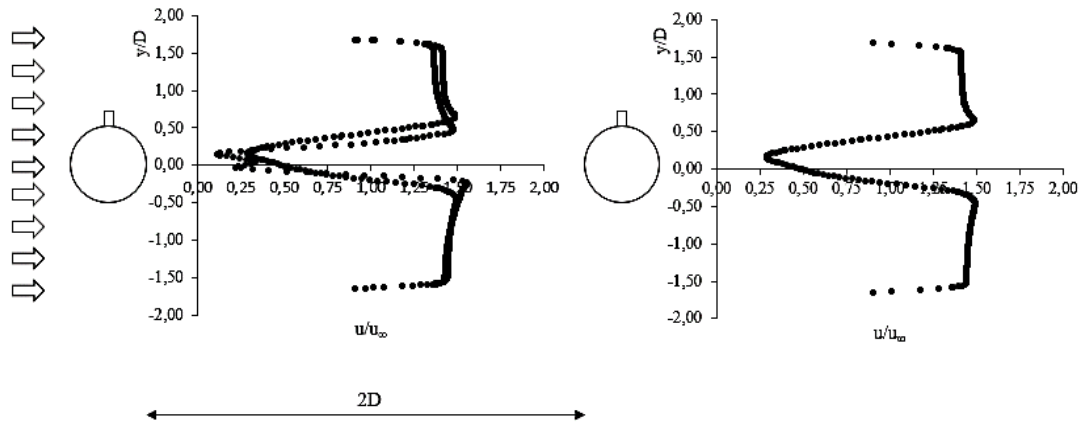
Şekil 3.54’de N durumu ve şekil 3.55’ de S durumu için elde edilen hız dağılımları verilmiştir. Analiz verisi hız dağılımlarında deneysel verilerde gözlenen çalkantılar

görülemese de S durumunda düşük hızlı ayrılmış akış bölgesinin N durumuna göre daha geniş olduğu görülmektedir.



Şekil 3.56. N2N durumunda sayısal analiz hız dağılımı

Şekil 3.56'da N2N durumu ve şekil 3.57' de S2S durumu için elde edilen hız dağılımları verilmiştir. N2N durumunda mansap silindiri art izi bölgesinde kalan hız dağılımında hızın memba silindirine göre daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. S2S durumunda ise N2N aksine memba silindiri hız değerleri daha yüksek olmuştur.

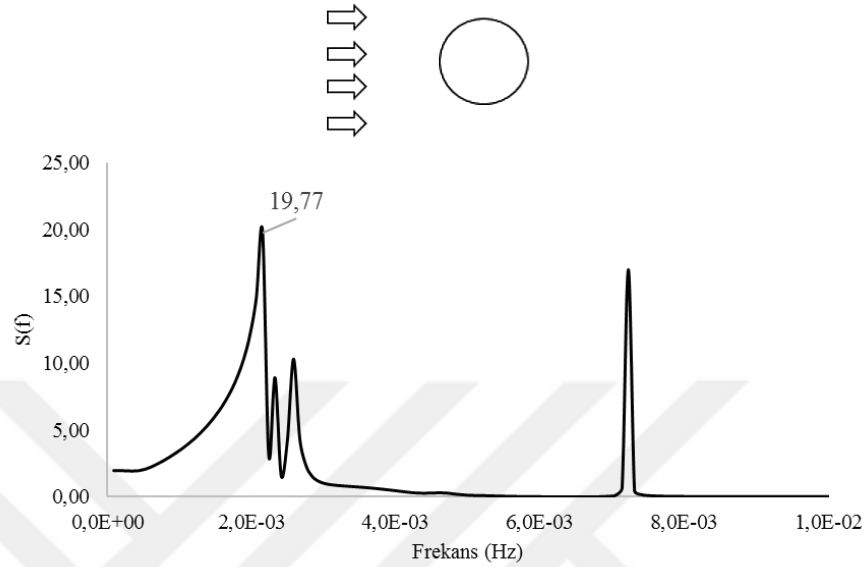


Şekil 3.57. S2S durumunda sayısal analiz hız dağılımı

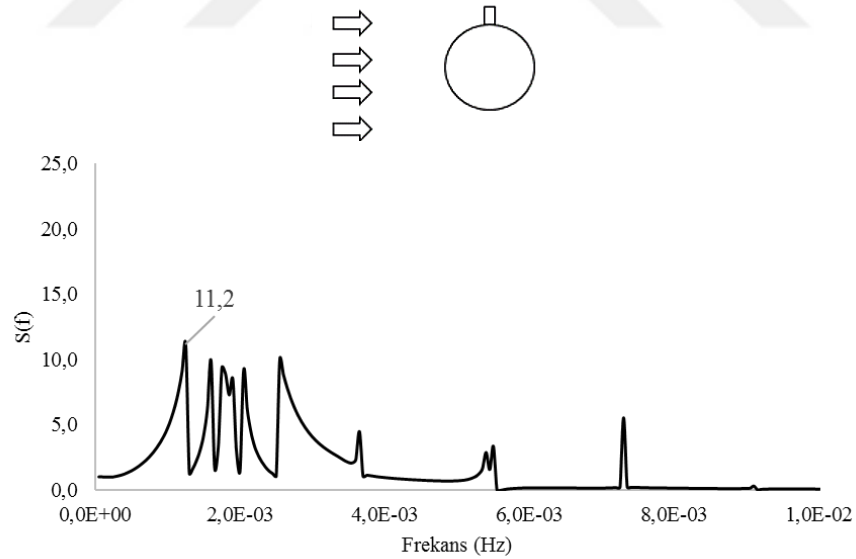
3.3.2.1. Sayısal Analiz Girdap Kopma Frekansı Sonuçları

Sayısal analiz girdap kopma frekanslarını hesaplamak için *ANSYS FLUENT* programında bulunan FFT (Fast Fourier Transform) kullanılmıştır. FFT analizinde zamana bağlı olarak alınan sürüklenme kuvveti ve kaldırma kuvveti verileri kullanılmıştır. FFT ya da hızlı

fourier dönüşümü zaman alanındaki bir veriyi frekans alanına dönüştürmek için kullanılan matematiksel bir araçtır.

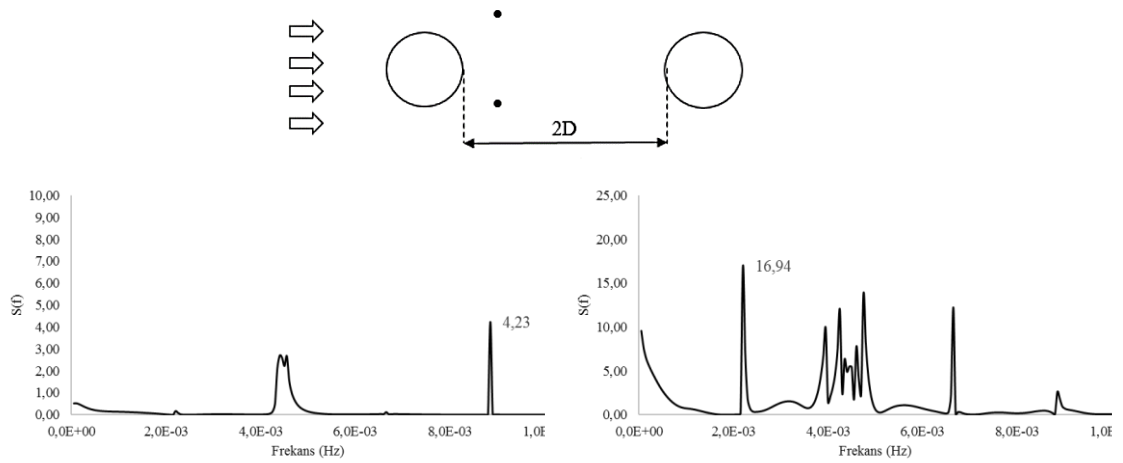


Şekil 3.58. N durumu sayısal analiz FFT spektral sonuçları



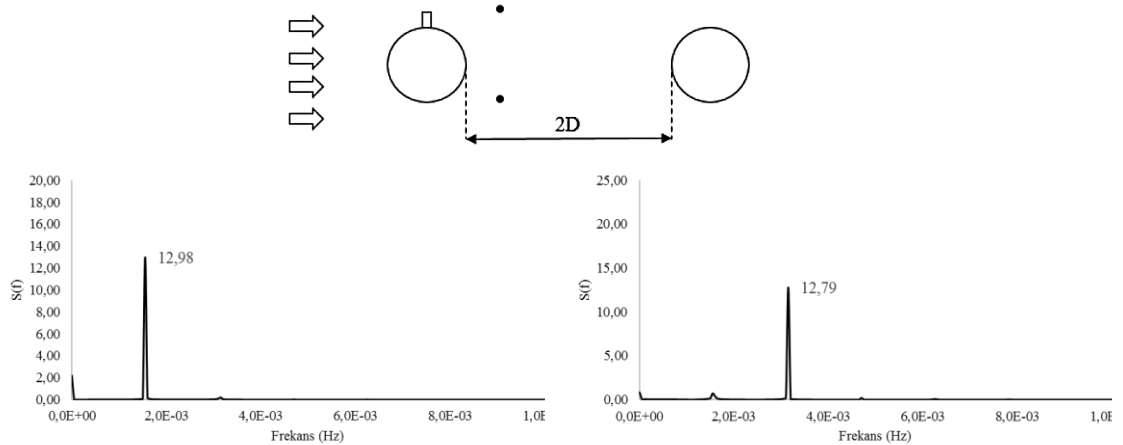
Şekil 3.59. S durumu sayısal analiz FFT spektral sonuçları

Şekil 3.58’de başlıksız tek silindir ve şekil 3.59’da başlıklı tek silindire ait spektral grafikleri verilmiştir. N durumunda elde edilen pik değerlerine bakıldığında frekans değerinin 19,77 olduğu görülmektedir. S durumunda ise frekans değeri 11,20 olarak elde edilmiştir. Başlık kullanımının frekans değerini düşürdüğü görülmektedir. Frekans değerlerinin düşük olması art izinde oluşan girdapların büyüdüğünü göstermektedir.



Şekil 3.60. N2N durumu sayısal analiz FFT spektral sonuçları

Şekil 3.60'da N2N durumuna ait spektral sonuçları verilmiştir. Spektral grafikleri memba silindiri art izinde ve mansap silindiri art izinde elde edilmiş ve bu şekilde grafikleştirilmiştir. N2N durumunda deneysel şartlara benzer şekilde memba silindiri art izi bölgesinde kayda değer pik yapan bir grafik elde edilememiştir. $L/D = 2$ boşluk oranı için memba silindirinin başlıksız olması durumunda mansap silindirinin başlığı önemli olmaksızın mansap silindiri memba silindirinin art izi içinde kalmaktadır.



Şekil 3.61. S2S durumu sayısal analiz FFT spektral sonuçları

Şekil 3.61'de S2S durumuna ait spektral grafikleri verilmiştir. $L/D = 2$ boşluk oranında memba silindiri başlıklı olduğunda memba silindiri art izinde spektral analiz ile pik veren grafikler elde edilmiştir. Ancak S2N ve S2S durumlarının ikisinde de memba ve mansap silindiri pik değerleri deneysel veriye uygun olacak şekilde yaklaşık olarak aynıdır. S2S kombinasyonunda memba silindirindeki başlık art izi bölgesini genişlettiğinden mansap

silindiri tamamen bu bölgede kalmakta bu nedenle memba ve mansap art izi frekansları aynı olmaktadır.

Tablo 3.8. Sayısal analiz verilerine göre hesaplanan Strouhal sayıları

			Başlık Durumu			
			NN	SS	N	S
Boşluk Oranı	2D	Memba Silindiri	0,04	0,13	-	-
		Mansap Silindiri	0,16	0,13	-	-
	Tek Silindir		-	-	0,20	0,11

Sayısal analiz verilerinden elde edilen Strouhal sayıları tablo 3.8’de verilmiştir. Hesaplanan St değerleri incelendiğinde elde edilen verilerin deneyler ile uyum içinde olduğu görülmektedir.

3.3.3 Sayısal Analiz Aerodinamik Kuvvet Bulguları

Sayısal analiz çıktısı olarak sürüklenme katsayıları ve kaldırma katsayıları zamana bağlı verisi alınmıştır. Elde edilen verilerin zaman ortalaması alınmış ve her bir durum için sürüklenme ve kaldırma katsayıları elde edilmiştir.

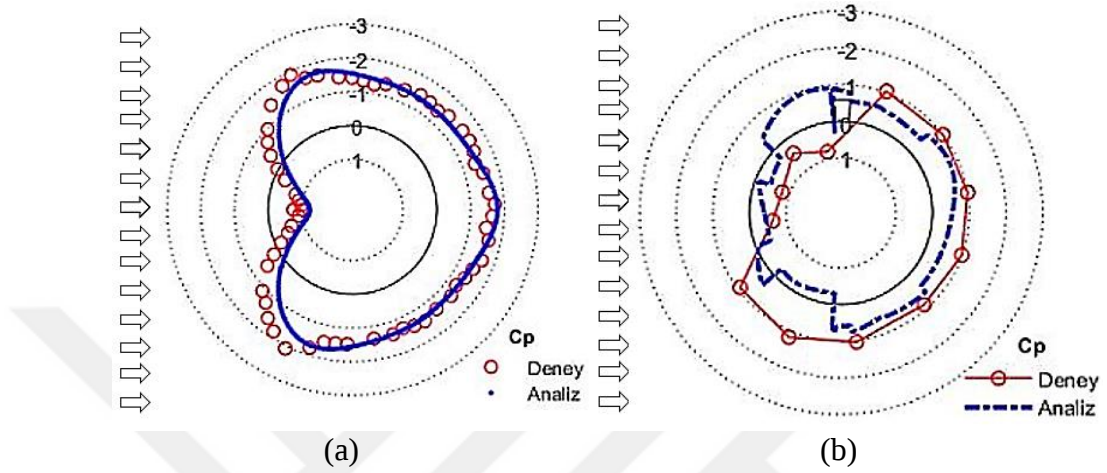
Tablo 3.9. Silindirlere ait sürüklenme ve kaldırma katsayısı değerleri

		Analiz	Deney
Sürüklenme Katsayısı	N C_D	1,67	1,73
Kaldırma Katsayısı	N C_L	0,00	-0,08
Sürüklenme Katsayısı	S C_D	1,95	1,89
Kaldırma Katsayısı	S C_L	-1,33	-1,48
Sürüklenme Katsayısı	N2N Memba C_D	1,37	1,29
	N2N Mansap C_D	0,19	0,14
Kaldırma Katsayısı	N2N Memba C_L	-0,01	-0,04
	N2N Mansap C_L	-0,70	-0,03
Sürüklenme Katsayısı	S2S Memba C_D	1,98	1,83
	S2S Mansap C_D	0,21	0,05
Kaldırma Katsayısı	S2S Memba C_L	-0,97	-0,83
	S2S Mansap C_L	0,02	0,09

Tablo 3.9’da silindirlere ait sürüklenme ve kaldırma katsayıları hem analiz verileri hem de deneysel veriler aynı tabloda yer alacak şekilde verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde silindire başlık eklenmesi durumunda deneysel verilerle uyumlu şekilde sürüklenme katsayısı artmış ve negatif olarak kaldırma katsayısı etki etmiştir.

3.3.4 Sayısal Analiz Basınç Bulguları

Sayısal analiz çıktısı olarak alınan basınç katsayısı verileri *MATLAB* paket programı aracılığı ile silindirik koordinatlarda gösterilmiştir.



Şekil 3.62. Başlıklı ve başlıksız tek silindir için sayısal analiz basınç katsayısı dağılımı

Şekil 3.62’de N (a) ve S (b) durumunu için sayısal analiz sonucu elde edilen ve deneylerden elde edilen basınç katsayısı dağılımı verilmiştir. Silindir üzerine başlık yerleştirilmesi silindir memba ve mansabındaki basınç dağılımını büyük oranda değiştirmektedir. Başlıklı silindir için silindir mansabında basınç azalmıştır, silindir membaında ise basınç artmıştır.

BÖLÜM 4

TARTIŞMA

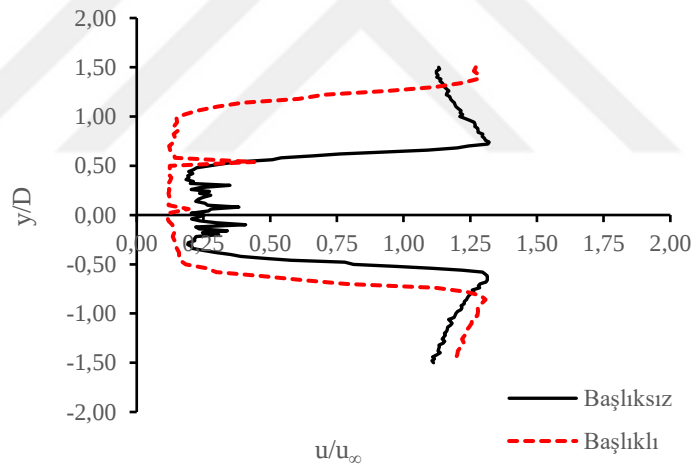
4.1. Tek Silindir İçin Başlık Durumunun Etkisi

- Başlıksız silindir (N) ile yapılan deney sonuçlarına göre elde edilen kaldırma katsayısı sıfıra çok yakın bir değer olarak ölçülmüştür. ($C_{L\text{başlıksız}} = -0,08$)
- Başlıklı silindir (S) ile yapılan deney sonuçlarına göre negatif kaldırma katsayısı ölçülmüştür. ($C_{L\text{başlıklı}} = -1,48$)
- Başlıksız silindir ve başlıklı silindir ile yapılan duman deneylerine bakıldığında; başlıklı durumda art izinde oluşan boşluk bölgesi başlıksız silindirinkine göre oldukça büyüktür.
- Başlıksız silindir ve başlıklı silindir ile yapılan sürükleme kuvveti deneylerine bakıldığında; başlıklı silindirin sürükleme katsayısı başlıksız silindirin sürükleme katsayısından daha büyük elde edilmiştir. ($C_{D\text{başlıklı}} = 1,89$, $C_{D\text{başlıksız}} = 1,73$)
- Başlıksız silindir ile yapılan basınç ölçümlerinden elde edilen sonuçlara göre; $29,62^\circ$ lik kısımda pozitif basınç ölçülürken, geri kalan $330,38^\circ$ lik kısımda negatif basınç değeri ölçülmüştür. Maksimum basınç katsayısının ölçüldüğü durma noktası $354,02^\circ$ olarak elde edilmiştir.
- Başlıklı silindir ile yapılan basınç ölçüm deneylerinde $84,3^\circ$ lik kısımda pozitif basınç ölçülürken, geri kalan $275,7^\circ$ lik kısımda negatif basınç değeri ölçülmüştür.

Başlıklı silindir ile yapılan basınç ölçümlerinde $19,37^\circ$ ve $77,47^\circ$ ’lerde maksimum basınç katsayısı $C_p = 0,80$ elde edilirken bu iki nokta arasında bulunan $51,27^\circ$ ’de pozitif ancak daha düşük bir basınç katsayısı $C_p = 0,42$ elde edilmiştir. Başlıklı

silindirde yapılan iki farklı rüzgâr hızı 5 m/s ve 10 m/s deneylerinin her ikisinde de C_p farklı değerlerde olsa da aynı şekilde trend göstermiştir.

- Yerel ivmeden kaynaklı atalet kuvvetlerinin taşınımlı ivmeden kaynaklı atalet kuvvetlerine oranı olarak ifade edilebilen Strouhal boyutsuz sayısı başlıksız silindirde $St_{\text{başlıksız}} = 0,21$ değerini alırken; bu değer başlıklı silindir için $St_{\text{başlıklı}} = 0,13$ olmaktadır.
- S durumunda düşük hızlı ayrılmış akış bölgesinin N durumuna göre daha geniştir. Başlığın kullanılması silindir art izi bölgesinde türbülans yoğunluğunun azalmasına neden olmuştur. N durumunda ayrılmış akış alanı daha dar olduğundan atalet kuvvetlerinin fazla olduğu, akımın atalet kuvvetleri ile bastırıldığı söylenebilir.



Şekil 4.1. Başlıklı ve başlıksız silindir hız dağılımı

4.2. Silindirlerin Arka Arkaya Yerleştirilmesi Durumlarında $L/D = 2$ İçin Başlık Etkisi

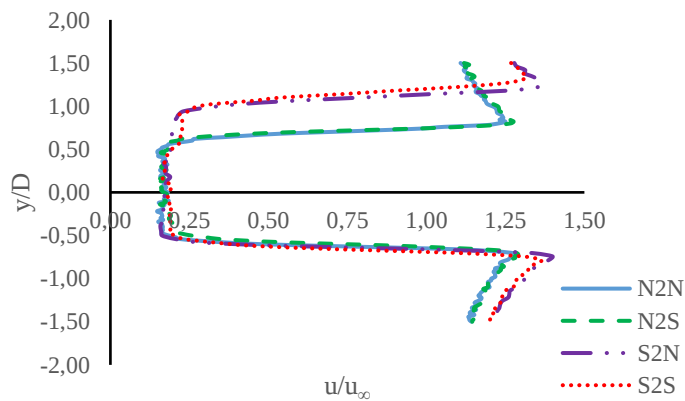
- Başlıksız silindire etkiyen kaldırma katsayısı yalnızca başlıklı silindirin mansabında yer alması durumunda (S2N) $C_{L\text{başlıksız, mansap}} = 0,20$ değerini alırken, diğer tüm durumlar için (N2N, N2S) memba ve mansapta sıfıra oldukça yakın değerler almaktadır.

- Başlıklı silindir membada olması durumundan her ikisinde de mansabındaki silindirin başlık durumu önemli olmaksızın (S2N ve S2S) $C_{Lbaşlıklı, memba} = -0,83, -0,84$ değerlerini almıştır. Kaldırma katsayısı başlıklı silindirin tek başına olması durumu düşünüldüğünde %44 oranında azalmıştır.
- Memba ve mansap silindirlerinin ikisinin de başlıklı olması durumunda (S2S) mansap silindire etkiyen sürüklenme katsayısı $C_{Lbaşlıklı, mansap} = 0,09$ gibi sıfıra oldukça yakın bir değer almıştır.
- Başlıklı silindirin başlıksız silindir mansabında olması durumunda (N2S) $C_{Lbaşlıklı, mansap} = -0,75$ değerini almıştır. Kaldırma katsayısı başlıklı silindirin tek başına olması durumu düşünüldüğünde, başlıklı silindir mansapta olduğunda %49 oranında azalmıştır.
- Başlıksız silindirin yine başlıksız silindir mansabında olması durumunda (N2N) $C_{Dbaşlıksız, mansap} = 0,14$ değerini alırken; başlıklı silindirin mansabında olması durumunda (S2N) bu değer $C_{Dbaşlıksız, mansap} = 0,04$ değerini almaktadır. Memba kısmında bulunan başlıklı silindir mansabındaki başlıksız silindire etkiyen sürüklenme katsayısını %70 azaltmaktadır.
- Başlıksız silindirin membada olduğu iki durumda da (N2N) ve (N2S) durumlarında $C_{Dbaşlıksız, memba} = 1,29$ değerini almıştır. Bu durum başlıksız silindirin tek olduğu (N) durum ile karşılaştırıldığında, mansapta bulunan başlıklı veya başlıksız silindir membadaki silindirin sürüklenme katsayısını %25 azaltmaktadır.
- Başlıklı silindirin yine başlıklı bir silindir mansabında olması durumunda (S2S) $C_{Dbaşlıklı, mansap} = 0,05$ değerini alırken; başlıksız silindirin mansabında yer alması durumunda (N2S) bu değer $C_{Dbaşlıklı, mansap} = 0,62$ değerini almaktadır. Memba kısmında bulunan başlıklı silindir, mansabındaki başlıklı silindire etkiyen sürüklenme katsayısını %92 azaltmaktadır.
- Başlıklı silindirin membada olduğu durumlardan ikisinde (S2S) ve (S2N) durumlarında başlıklı silindire etkiyen sürüklenme katsayısı sırası ile $C_{Dbaşlıklı, memba} = 1,83$ ve $C_{Dbaşlıklı, memba} = 1,87$ değerlerini almıştır. Bu durumlar

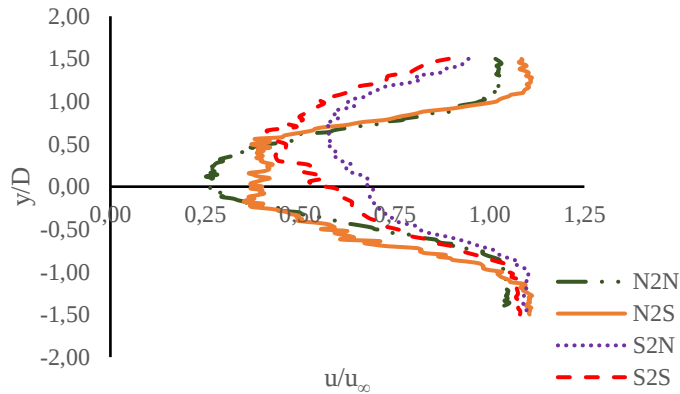
başlıklı silindirin tek başına olduğu (S) durum ile karşılaştırıldığında, başlıklı silindir membada olması durumunda sürüklenme katsayısı %0,03 ve %0,01 gibi az bir oranda azalmaktadır.

- $L/D = 2$ durumunda mansap silindiri memba silindirinin ayrılmış bölgesinde kaldığı için mansap silindirinin sürüklenme katsayısı oldukça küçük çıkmaktadır.
- Aynı zamanda mansaptaki silindir memba silindirinin ayrılmış bölge alanını bloke ederek küçülttüğü için memba silindirinin sürüklenme katsayısını da bir miktar düşürmektedir. Ancak bu etki silindirin tek olması durumu ile karşılaştırıldığında başlıklı silindirde %0,01 mertebesindeyken başlıksız silindirde %25 olmaktadır.
- $L/D = 2$ durumlarının tüm konfigürasyonlarında mansapta bulunan silindirlerin tamamında negatif basınç alanı etkilidir.
- Başlıksız silindirin membada olması durumlarının ikisinde de (N2N ve N2S) $29,62^\circ$ lik kısımda pozitif basınç ölçülürken geri kalan $330,38^\circ$ lik kısımda negatif basınç değeri ölçülmüştür. N2N durumunda maksimum basınç katsayısı $C_p = 0,67$ değerini alırken N2S durumunda maksimum basınç katsayısı $C_p = 0,75$ değerini almaktadır. Her iki durumda da maksimum basınç $354,02^\circ$ noktasında oluşmaktadır.
- Başlıklı silindirin membada olması durumlarının ikisinde de (S2S ve S2N) $84,3^\circ$ lik kısımda pozitif basınç ölçülürken, geri kalan $275,7^\circ$ lik kısımda negatif basınç değeri ölçülmüştür. S2S durumunda maksimum basınç katsayısı $C_p = 0,53$ değerini alırken S2N durumunda maksimum basınç katsayısı $C_p = 0,70$ değerini almaktadır. Her iki durumda da maksimum basınç $19,37^\circ$ noktasında oluşmaktadır.
- Başlıklı silindirin membada olduğu durumlarda (S2S) (S2N) yapılan basınç ölüm deneylerinin ikisinde de maksimum basınç katsayısı $19,37^\circ$ 'de oluşmuştur. Her iki durumda da $51,27^\circ$ 'de ve $77,47^\circ$ 'de pozitif ancak daha düşük bir basınç katsayısı elde edilmiştir. Bu durum başlıksız silindirlerin membada olduğu durumlarda (N2N) (N2S) gözlenmemiştir.

- Basınç ölçümlerinden elde edilen sonuçlara bakıldığında memba silindirlerinde N2N ve N2S aynı şekilde trend izlerken; S2S ve S2N de kendi içlerinde benzer trend göstermektedirler. Mansap silindirlerine bakıldığında ise S2S, S2N, N2N, N2S durumlarının tamamı da negatif ancak farklı trendi izlemektedirler.
- Başlıksız silindirin başlıklı silindir membaında olması durumunda (N2S) memba silindirinin 0,5 D kadar arkasında Strouhal sayısı frekansın belirlenememesi sebebi ile hesaplanamamıştır. N2S durumunda mansap silindirinin 0,5 D kadar arkasında ise silindirin hem alt bölgesinde hem de üst bölgesinde Strouhal sayısı 0,17 değerini almıştır.
- İki başlıklı silindirin arka arkaya olması durumunda (S2S) ve başlıklı silindirin başlıksız silindir membaında olması durumunda (S2N); hem memba silindirinin 0,5 D kadar arkasında, hem de mansap silindirinin 0,5 D kadar arkasında silindirin alt ve üst bölgelerinde Strouhal sayısı 0,13 değerini almıştır.
- İki başlıksız silindirin arka arkaya olması durumunda (N2N) memba silindirinin 0,5 D kadar arkasında Strouhal sayısı frekansın belirlenememesi sebebi ile hesaplanamamıştır. N2N durumunda mansap silindirinin 0,5 D kadar arkasında ise silindirin hem alt bölgesinde hem de üst bölgesinde Strouhal sayısı 0,16 değerini almıştır.



Şekil 4.2. 2D boşluk durumunda silindirler arasındaki bölgede hız dağılımı- başlık etkisi



Şekil 4.3. 2D boşluk durumunda mansap silindiri arka bölgesinde hız dağılımı- başlık etkisi

4.3. Silindirlerin Arka Arkaya Yerleştirilmesi Durumlarında $L/D = 4$ İçin Başlık Etkisi

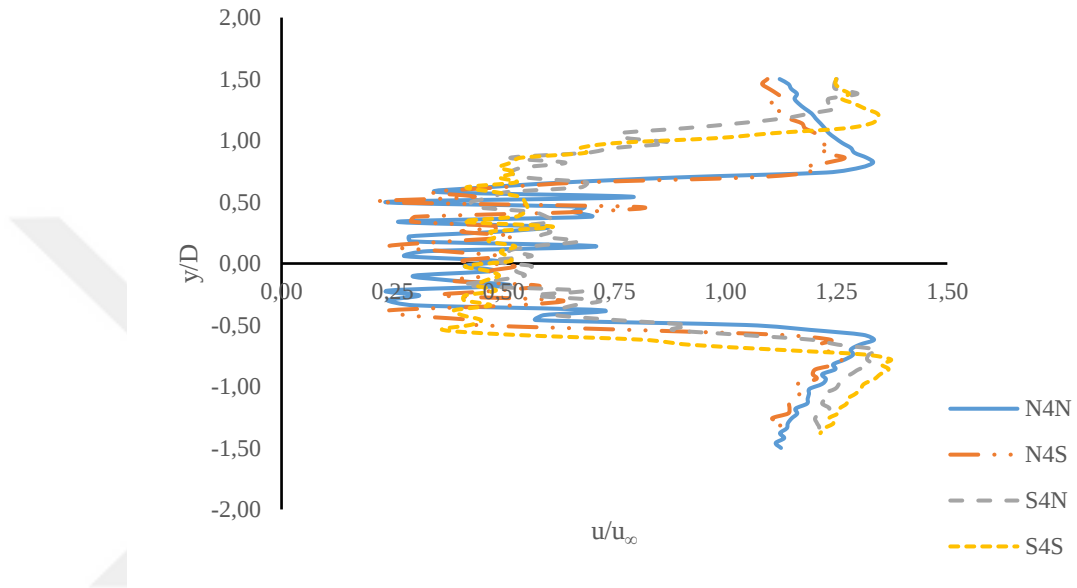
- Başlıksız silindire etkiyen kaldırma katsayısı; S4N, N4S ve N4N durumlarının tamamında, başlıksız silindirin hem memba hem de mansapta olması durumunda sıfıra oldukça yakın değerler almaktadır.
- Başlıklı silindir membada olması durumundan her ikisinde de mansabındaki silindirin başlık durumu önemli olmaksızın (S4N ve S4S) $C_{L\text{başlıklı, memba}} = -0,78, -0,77$ değerlerini almıştır. Kaldırma katsayısı başlıklı silindirin tek başına olması durumu düşünüldüğünde %47 oranında azalmıştır.
- Başlıklı silindirin başlıksız silindir mansabında olması durumunda (N4S) $C_{L\text{başlıklı, mansap}} = -1,17$ değerini almıştır. Kaldırma katsayısı başlıklı silindirin tek başına olması durumu düşünüldüğünde, başlıklı silindir mansapta olduğunda %21 oranında azalmıştır.
- Memba ve mansap silindirlerinin ikisinin de başlıklı olması durumunda (S4S) mansap silindire etkiyen sürüklenme katsayısı $C_{L\text{başlıklı, mansap}} = -0,39$ değerini almaktadır.
- Başlıksız silindirin yine başlıksız silindir mansabında olması durumunda (N4N) $C_{D\text{başlıksız, mansap}} = 0,90$ değerini alırken; başlıklı silindirin mansabında olması durumunda (S4N) bu değer $C_{D\text{başlıksız, mansap}} = 0,80$ değerini almaktadır. Memba

kısımında bulunan başlıklı silindir mansabındaki başlıksız silindire etkiyen sürüklenme katsayısını %11 azaltmaktadır.

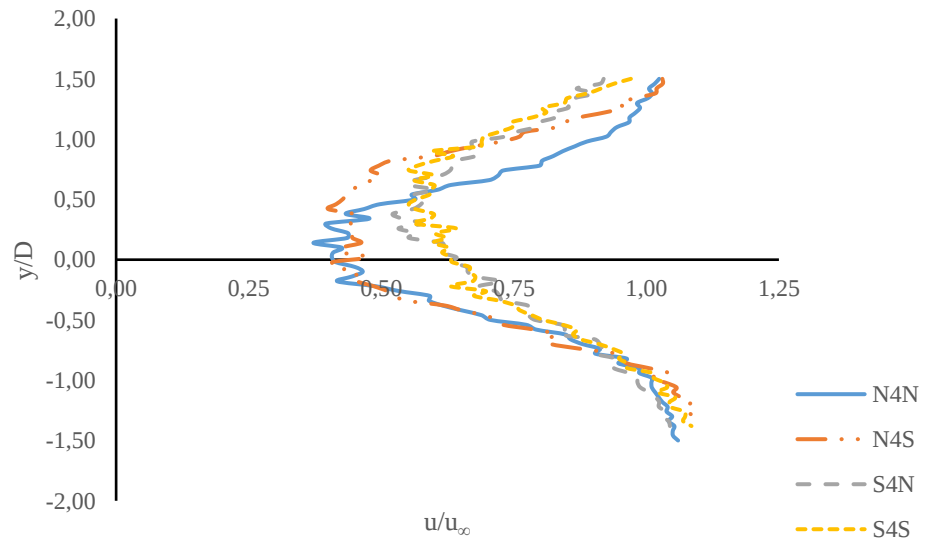
- Başlıksız silindirin membada olduğu iki durumda da (N4N) ve (N4S) durumlarında sürüklenme katsayısı sırası ile $C_{D\text{başlıksız, memba}} = 1,48$ ve $1,41$ değerlerini almıştır. Bu durum başlıksız silindirin tek olduğu (N) durum ile karşılaştırıldığında, mansapta bulunan başlıksız silindir membadaki silindirin sürüklenme katsayısını %14 oranında azaltırken; başlıklı silindir membadaki silindirin sürüklenme katsayısını %19 azaltmaktadır.
- Başlıklı silindirin yine başlıklı bir silindir mansabında olması durumunda (S4S) $C_{D\text{başlıklı, mansap}} = 0,87$ değerini alırken; başlıksız silindirin mansabında yer alması durumunda (N4S) bu değer $C_{D\text{başlıklı, mansap}} = 1,28$ değerini almaktadır. Memba kısmında bulunan başlıklı silindir mansabındaki başlıklı silindire etkiyen sürüklenme katsayısını %32 oranında azaltmaktadır.
- Başlıklı silindirin membada olduğu durumlardan ikisinde (S4S) ve (S4N) durumlarında başlıklı silindire etkiyen sürüklenme katsayısı sırası ile $C_{D\text{başlıklı, memba}} = 1,76$ ve $C_{D\text{başlıklı, memba}} = 1,71$ değerlerini almıştır. Bu durumlar başlıklı silindirin tek başına olduğu (S) durum ile karşılaştırıldığında, başlıklı silindirin membada olması durumunda sürüklenme katsayısı %0,07 ve %0,09 gibi az bir oranda azalmaktadır.
- $L/D = 4$ durumunda mansap silindirlerinin sürüklenme katsayıları dikkate alınacak büyüklüklerde çıkmaktadır. Bu durumda mansap silindiri memba silindirinin ayrılmış bölgesinden etkilenmekte ancak tam olarak bu alan içerisinde kalmamaktadır.
- Aynı zamanda mansaptaki silindir memba silindirinin ayrılmış bölge alanını bloke ederek küçülttüğü için memba silindirinin sürüklenme katsayısını da bir miktar düşürmektedir. Ancak bu etki silindirin tek olması durumu ile karşılaştırıldığında başlıklı silindirde %0,07 mertebesindeyken başlıksız silindirde %14 olmaktadır.
- $L/D = 4$ durumlarının tüm konfigürasyonlarında mansapta bulunan silindirlerin tamamında negatif basınç alanı etkilidir.

- Başlıksız silindirin membada olması durumlarının ikisinde de (N4N ve N4S) $29,62^\circ$ lik kısımda pozitif basınç ölçülürken geri kalan $330,38^\circ$ lik kısımda negatif basınç değeri ölçülmüştür. N4N durumunda maksimum basınç katsayısı $C_p = 0,69$ değerini alırken N4S durumunda maksimum basınç katsayısı $C_p = 0,72$ değerini almaktadır. Her iki durumda da maksimum basınç $354,02^\circ$ noktasında oluşmaktadır.
- Başlıklı silindirin membada olması durumlarının ikisinde de (S4S ve S4N) $84,3^\circ$ lik kısımda pozitif basınç ölçülürken, geri kalan $275,7^\circ$ lik kısımda negatif basınç değeri ölçülmüştür. S4S durumunda maksimum basınç katsayısı $C_p = 0,63$ değerini $77,47^\circ$ noktasında alırken, S4N durumunda maksimum basınç katsayısı $C_p = 0,79$ değerini $19,37^\circ$ noktasında almaktadır.
- Başlıklı silindirin membada olduğu durumlarda (S4S) (S4N) yapılan basınç ölüm deneylerinin ikisinde de $19,37^\circ$ 'de ve $77,47^\circ$ 'de pozitif yüksek basınç oluşmuştur. Yine bu durumlar için $51,27^\circ$ 'de pozitif ancak daha düşük bir basınç katsayısı elde edilmiştir. Bu durum başlıksız silindirlerin membada olduğu durumlarda (N4N) (N4S) gözlenmemiştir.
- Basınç ölçümlerinden elde edilen sonuçlara bakıldığında memba silindirlerinde N4N ve N4S aynı şekilde trend izlerken; S4S ve S4N de kendi içlerinde benzer trend göstermektedirler. Mansap silindirlerine bakıldığında ise S4S, S4N, N4N, N4S durumlarının tamamı da negatif ancak farklı trend izlemektedirler.
- İki başlıksız silindirin arka arkaya olması durumunda (N4N); hem memba silindirinin $0,5 D$ kadar arkasında hem de mansap silindirinin $0,5 D$ kadar arkasında silindir alt ve üst bölgelerinde Strouhal sayısı $0,20$ değerini almıştır.
- Başlıksız silindirin başlıklı silindir membaında olması durumunda (N4S) memba silindirinin $0,5 D$ kadar arkasında hem alt bölgede hem de üst bölgede Strouhal sayısı $0,20$ değerini almıştır. N2S durumunda mansap silindirinin $0,5 D$ kadar arkasında ise silindirin hem alt bölgesinde hem de üst bölgesinde Strouhal sayısı $0,14$ değerini almıştır.

- İki başlıklı silindirin arka arkaya olması durumunda (S4S) ve başlıklı silindirin başlıksız silindir membaında olması durumunda (S4N); hem memba silindirin 0,5 D kadar arkasında, hem de mansap silindirin 0,5 D kadar arkasında silindirin alt ve üst bölgelerinde Strouhal sayısı 0,16 değerini almıştır.



Şekil 4.4. 4D boşluk durumunda silindirler arasındaki bölgede hız dağılımı- başlık etkisi



Şekil 4.5. 4D boşluk durumunda mansap silindiri arka bölgesinde hız dağılımı- başlık etkisi

4.4. Silindirlerin Arka Arkaya Yerleştirilmesi Durumlarında $L/D = 7$ İçin Başlık Etkisi

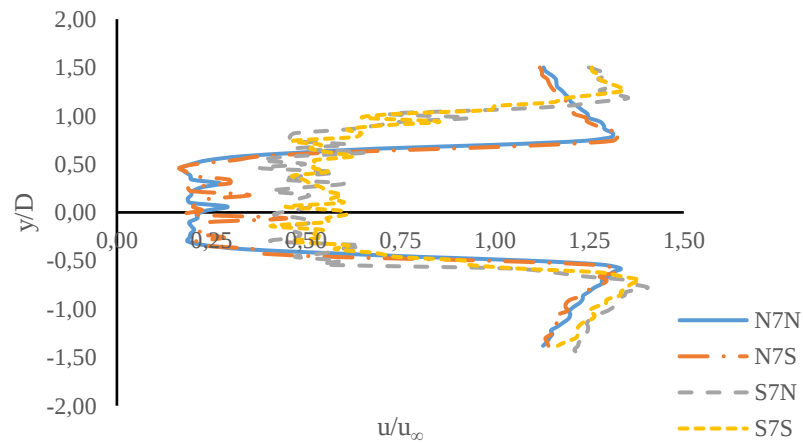
- Başlıksız silindire etkiyen kaldırma katsayısı; S7N, N7S ve N7N durumlarının tamamında, başlıksız silindirin hem memba hem de mansapta olması durumunda sıfıra oldukça yakın değerler almaktadır.
- Başlıklı silindirin yine başlıklı bir silindirin membaında olduğu (S7S) durumunda $C_{Lbaşlıklı, memba} = -1,55$ değerini almaktadır. Başlıklı silindirin başlıksız silindir membaında olması durumunda (S7N) ise $C_{Lbaşlıklı, memba} = -1,65$ olmaktadır. Kaldırma katsayısı başlıklı silindirin tek başına olması durumu düşünüldüğünde S7S durumunda %0,05 artarken, S7N durumunda %11 oranında artmıştır.
- Başlıklı silindirin başlıksız silindir mansabında olması durumunda (N7S) $C_{Lbaşlıklı, mansap} = -1,37$ değerini almıştır. Kaldırma katsayısı başlıklı silindirin tek başına olması durumu düşünüldüğünde, başlıklı silindir mansapta olduğunda %0,07 oranında azalmıştır.
- Memba ve mansap silindirlerinin ikisinin de başlıklı olması durumunda (S7S) mansap silindire etkiyen sürüklenme katsayısı $C_{Lbaşlıklı, mansap} = -0,73$ değerini almaktadır.
- Başlıksız silindirin yine başlıksız silindir mansabında olması durumunda (N7N) $C_{Dbaşlıksız, mansap} = 1,65$ değerini alırken; başlıklı silindirin mansabında olması durumunda (S7N) bu değer $C_{Dbaşlıksız, mansap} = 0,88$ değerini almaktadır. Memba kısmında bulunan başlıklı silindir mansabındaki başlıksız silindire etkiyen sürüklenme katsayısını %47 azaltmaktadır.
- Başlıksız silindirin başlıksız silindir membaında olduğu (N7N) durumda $C_{Dbaşlıksız, memba} = 1,64$ değerini almaktadır. Bu durum başlıksız silindirin tek olduğu (N) durum ile karşılaştırıldığında, mansapta bulunan başlıksız silindir membaındaki silindirin sürüklenme katsayısını %0,05 oranında azaltmıştır.
- Başlıksız silindirin başlıklı silindir membaında olduğu durumda (N7S) sürüklenme katsayısı $C_{Dbaşlıksız, memba} = 1,81$ olmaktadır. Bu durum başlıksız silindirin tek

olduğu (N) durum ile karşılaştırıldığında, başlıklı silindir membadaki silindirin sürüklenme katsayısını %0,05 artırmaktadır.

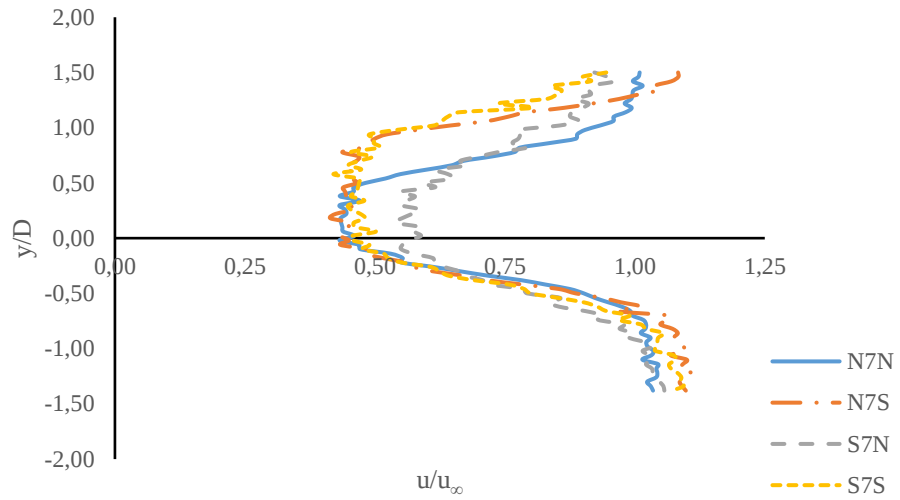
- Başlıklı silindirin yine başlıklı bir silindir mansabında olması durumunda (S7S) $C_{D\text{başlıklı, mansap}} = 1,23$ değerini alırken; başlıksız silindirin mansabında yer alması durumunda (N7S) bu değer $C_{D\text{başlıklı, mansap}} = 1,10$ değerini almaktadır. Mamba kısmında bulunan başlıklı silindir mansabındaki başlıklı silindire etkiyen sürüklenme katsayısını %11 oranında azaltmaktadır.
- Başlıklı silindirin membada olduğu durumlardan ikisinde (S7S) ve (S7N) durumlarında başlıklı silindire etkiyen sürüklenme katsayısı sırası ile $C_{D\text{başlıklı, memba}} = 2,51$ ve $C_{D\text{başlıklı, memba}} = 2,40$ değerlerini almıştır. Bu durumlar başlıklı silindirin tek başına olduğu (S) durum ile karşılaştırıldığında; başlıklı silindirin membada olduğu $L/D = 7$ durumlarında, sürüklenme katsayısı %0,25 ve %0,21 oranında artırmaktadır.
- $L/D = 7$ durumlarının tüm konfigürasyonlarında mansapta bulunan silindirlerin tamamında negatif basınç alanı etkilidir.
- Başlıksız silindirin membada olması durumlarının ikisinde de (N7N ve N7S) $29,62^\circ$ lik kısımda pozitif basınç ölçülürken geri kalan $330,38^\circ$ lik kısımda negatif basınç değeri ölçülmüştür. N7N durumunda maksimum basınç katsayısı $C_p = 0,89$ değerini alırken N7S durumunda maksimum basınç katsayısı $C_p = 0,67$ değerini almaktadır. Her iki durumda da maksimum basınç $354,02^\circ$ noktasında oluşmaktadır.
- Başlıklı silindirin membada olması durumlarının ikisinde de (S7S ve S7N) $84,3^\circ$ lik kısımda pozitif basınç ölçülürken, geri kalan $275,7^\circ$ lik kısımda negatif basınç değeri ölçülmüştür. S7S durumunda maksimum basınç katsayısı $C_p = 0,67$ değerini $77,47^\circ$ noktasında alırken, S7N durumunda maksimum basınç katsayısı $C_p = 0,64$ değerini yine $77,47^\circ$ noktasında almaktadır.
- Başlıklı silindirin membada olduğu durumlarda (S7S) (S7N) yapılan basınç ölüm deneylerinin ikisinde de $19,37^\circ$ de ve $77,47^\circ$ de pozitif yüksek basınç oluşmuştur. Yine bu durumlar için $51,27^\circ$ de pozitif ancak daha düşük bir basınç katsayısı elde

edilmiştir. Bu durum başlıksız silindirlerin membada olduğu durumlarda (N7N) (N7S) gözlenmemiştir.

- Basınç ölçümlerinden elde edilen sonuçlara bakıldığında memba silindirlerinde N7N ve N7S aynı şekilde eğilim izlerken; S7S ve S7N de kendi içlerinde benzer trend göstermektedirler. Mansap silindirlerine bakıldığında ise S7S, S7N, N7N, N7S durumlarının tamamı da negatif ancak farklı eğilim izlemektedirler.
- İki başlıksız silindirin arka arkaya olması durumunda (N7N); hem memba silindirinin 0,5 D kadar arkasında Strouhal sayısı 0,20 değerini alırken; mansap silindirinin 0,5 D kadar arkasında silindir alt ve üst bölgelerinde Strouhal sayısı 0,21 değerini almıştır.
- Başlıksız silindirin başlıklı silindir membada olması durumunda (N7S) memba silindirinin 0,5 D kadar arkasında hem alt bölgede hem de üst bölgede Strouhal sayısı 0,21 değerini almıştır. N2S durumunda mansap silindirinin 0,5 D kadar arkasında ise silindirin hem alt bölgesinde hem de üst bölgesinde Strouhal sayısı 0,13 değerini almıştır.
- İki başlıklı silindirin arka arkaya olması durumunda (S7S) ve başlıklı silindirin başlıksız silindir membada olması durumunda (S7N); hem memba silindirinin 0,5 D kadar arkasında, hem de mansap silindirinin 0,5 D kadar arkasında silindirin alt ve üst bölgelerinde Strouhal sayısı 0,16 değerini almıştır.



Şekil 4.6. 7D boşluk durumunda silindirler arasındaki bölgede hız dağılımı- başlık etkisi



Şekil 4.7. 7D boşluk durumunda mansap silindiri arka bölgesinde hız dağılımı- başlık etkisi

4.5. Başlıksız İki Silindirin Arka Arkaya Yerleştirilmesi (NxN) Durumunda Boşluk Etkisi

Memba ve mansap silindirlerinin ikisinin de başlıksız olduğu durumda $L/D = 2, 4$ ve 7 olmak üzere üç farklı boşluk oranının etkisi incelenmiştir.

- Memba silindirleri incelendiğinde; $L/D = 2$ durumunda $C_{D\text{başlıksız, memba}} = 1,29$, $L/D = 4$ durumu için $C_{D\text{başlıksız, memba}} = 1,48$ ve $L/D = 7$ durumu için $C_{D\text{başlıksız, memba}} = 1,64$ değerini almıştır. Başlıksız tek silindir için ise $C_{D\text{başlıksız}} = 1,73$ değeri elde edilmiştir. Silindirler arası boşluk oranı arttıkça sürüklenme katsayısı artma eğilimi göstermiş ancak en yüksek boşluk oranında dahi tek silindirin sürüklenme katsayısına erişememiş, daha düşük değer almıştır.
- Mansap silindirleri incelendiğinde; $L/D = 2$ durumunda $C_{D\text{başlıksız, mansap}} = 0,14$, $L/D = 4$ durumu için $C_{D\text{başlıksız, mansap}} = 0,90$ ve $L/D = 7$ durumu için $C_{D\text{başlıksız, mansap}} = 1,65$ değerini almıştır. L/D oranının 2 olması durumunda mansap silindiri memba silindiri art izi bölgesi içinde kaldığından etki eden sürüklenme katsayısı oldukça küçük olmuştur. $L/D = 4$ durumunda mansap silindiri memba silindirinin art izi etkisinde kalmaktadır ancak içinde olmadığı elde edilen sürüklenme katsayısı değerinden

anlaşılmaktadır. $L/D = 7$ durumu için ise memba ve mansap silindirlerinde elde edilen sürüklenme katsayıları birbirinin aynısıdır. Bu durumda mansap silindiri memba silindirinin art izinden etkilenmemektedir. Duman görüntüleri bu durumu desteklemektedir.

- Tüm boşluk oranlarında memba ve mansap silindirlerine etkiyen kaldırma katsayısı sıfıra oldukça yakın bir değer almaktadır. Arka arkaya yerleştirilen silindirlerin ikisinin de başlıksız olması durumunda kaldırma etkisi olamamaktadır.
- Memba silindirlerin $0,5D$ kadar arkasında yapılan hız ölçümlerinden elde edilen Strouhal sayıları değerlendirildiğinde $L/D = 2$ durumunda bir frekans piki elde edilemediğinde değer elde edilememiştir. $L/D = 4$ durumunda da $L/D = 7$ durumunda da $St = 0,20$ değerini almıştır. Tek silindir (N) durumunda $St = 0,21$ değerini almıştır.
- Mansap silindirlerin $0,5D$ kadar arkasında yapılan hız ölçümlerinden elde edilen Strouhal sayıları değerlendirildiğinde $L/D = 2$ durumunda $St = 0,16$ $L/D = 4$ iken $St = 0,20$ ve $L/D=7$ de $St = 0,21$ değerini almıştır.
- $L/D = 4$ ve 7 durumlarında memba ve mansap silindirlerinin akım frekansları ve St sayıları tek silindir ile aynı olurken, $L/D = 2$ durumunda bu değerler daha düşük olmaktadır.

4.6. Başlıklı İki Silindirin Arka Arkaya Yerleştirilmesi (SxS) Durumunda Boşluk Etkisi

Memba ve mansap silindirlerinin ikisinin de başlıklı olduğu durumda $L/D = 2, 4$ ve 7 olmak üzere üç farklı boşluk oranının etkisi incelenmiştir.

- Memba silindirleri incelendiğinde; $L/D = 2$ durumunda $C_{D\text{başlıklı, memba}} = 1,83$, $L/D = 4$ durumu için $C_{D\text{başlıklı, memba}} = 1,76$ ve $L/D = 7$ durumu için $C_{D\text{başlıklı, memba}} = 2,51$ değerini almıştır. Başlıklı tek silindir için ise $C_{D\text{başlıklı}} = 1,89$ değeri elde edilmiştir. $L/D = 7$ durumu için sürüklenme katsayısı çok büyük çıkmaktadır. Bu durum basınç deneyleri ile değerlendirildiğinde iki deney birbirini doğrulamaktadır.

- Mansap silindirleri incelendiğinde; $L/D = 2$ durumunda $C_{D\text{başlıklı, mansap}} = 0,05$, $L/D = 4$ durumu için $C_{D\text{başlıklı, mansap}} = 0,87$ ve $L/D = 7$ durumu için $C_{D\text{başlıklı, mansap}} = 1,23$ değerini almıştır. L/D oranının 2 olması durumunda mansap silindiri memba silindiri art izi bölgesi içinde kaldığından etki eden sürüklenme katsayısı neredeyse sıfır olmuştur. $L/D = 4$ durumunda mansap silindiri memba silindirinin art izi etkisinde kalmaktadır ancak içinde olmadığı elde edilen sürüklenme katsayısı değerinden anlaşılmaktadır. $L/D = 7$ durumu için ise mansap silindiri için elde edilen sürüklenme katsayısı hem tek başlıklı silindirden hem de membaındaki silindirden küçük çıkmaktadır. Bu durumda en büyük boşluk oranı olan $L/D = 7$ de dahi mansap silindiri memba silindirinin art izinden etkilenmektedir.
- Memba silindirleri incelendiğinde; $L/D = 2$ durumunda $C_{L\text{başlıklı, memba}} = -0,83$, $L/D = 4$ durumu için $C_{L\text{başlıklı, memba}} = -0,77$ ve $L/D = 7$ durumu için $C_{L\text{başlıklı, memba}} = -1,55$ değerini almıştır. Başlıklı tek silindir için ise $C_{L\text{başlıklı}} = -1,48$ değeri elde edilmiştir. $L/D = 7$ durumu için negatif kaldırma katsayısı çok büyük çıkmaktadır.
- Mansap silindirleri incelendiğinde; $L/D = 2$ durumunda $C_{L\text{başlıklı, mansap}} = 0,09$, $L/D = 4$ durumu için $C_{L\text{başlıklı, mansap}} = -0,39$ ve $L/D=7$ durumu için $C_{L\text{başlıklı, mansap}} = -0,73$ değerini almıştır. $L/D = 2$ durumunda mansap silindirinde kaldırma etkisi görülmezken boşluk oranı arttıkça negatif kaldırma katsayısı artmıştır. Bu durumda boşluk oranının arttıkça mansap silindire etkiyen kaldırma kuvvetinin negatif olarak arttığını söylemek mümkündür. Ancak $L/D = 7$ için mansap silindirinde elde edilen katsayı tek silindirden daha küçüktür. Dolayısı ile $L/D = 7$ durumunda mansap silindiri memba silindirinden etkilenmektedir.
- Memba silindirlerin $0,5D$ kadar arkasında yapılan hız ölçümlerinden elde edilen Strouhal sayıları değerlendirildiğinde $L/D = 2$ için $St = 0,13$ olurken; $L/D = 4$ durumunda $St = 0,14$ ve $L/D = 7$ durumunda $St = 0,16$ değerini almıştır. Tek silindir (S) durumunda $St = 0,13$ değerini almıştır.

- Mansap silindirlerin 0,5D kadar arkasında yapılan hız ölçümlerinden elde edilen Strouhal sayıları değerlendirildiğinde $L/D = 2$ durumunda $St = 0,13$ $L/D = 4$ iken $St = 0,15$ ve $L/D = 7$ de $St = 0,16$ değerini almıştır.
- $L/D = 7$ durumlarında memba ve mansap silindirlerinin akım frekansları ve St sayıları tek silindirden daha büyük olmaktadır.

4.7. Memba Başlıklı ve Mansap Başlıksız Silindirin Arka Arkaya Yerleştirilmesi (SxN) Durumunda Boşluk Etkisi

Membada başlıklı ve mansapta başlıksız silindir olduğu durumda $L/D = 2, 4$ ve 7 olmak üzere üç farklı boşluk oranının etkisi incelenmiştir.

- Memba silindirleri incelendiğinde; $L/D = 2$ durumunda $C_{D\text{başlıklı, memba}} = 1,87$, $L/D = 4$ durumu için $C_{D\text{başlıklı, memba}} = 1,71$ ve $L/D = 7$ durumu için $C_{D\text{başlıklı, memba}} = 2,40$ değerini almıştır. Başlıklı tek silindir için ise $C_{D\text{başlıklı}} = 1,89$ değeri elde edilmiştir. $L/D = 7$ durumu için sürüklenme katsayısı çok büyük çıkmaktadır. Bu durum basınç deneyleri ile değerlendirildiğinde iki deney birbirini doğrulamaktadır.
- Başlıklı silindirin membada olduğu (SxS) ve (SxN) durumlarında memba silindirine etki eden sürüklenme katsayıları maksimum %0,04 farklı çıkmaktadır. Başlıklı silindir mansabına yerleştirilen silindirin başlıklı olup olmaması sürüklenme katsayısı üzerinde bir etki oluşturmamaktadır.
- Mansap silindirleri incelendiğinde; $L/D = 2$ durumunda $C_{D\text{başlıksız, mansap}} = 0,04$, $L/D = 4$ durumu için $C_{D\text{başlıksız, mansap}} = 0,80$ ve $L/D = 7$ durumu için $C_{D\text{başlıksız, mansap}} = 0,88$ değerini almıştır. L/D oranının 2 olması durumunda mansap silindiri memba silindiri art izi bölgesi içinde kaldığından etki eden sürüklenme katsayısı neredeyse sıfır olmuştur. $L/D = 4$ durumunda mansap silindiri memba silindirinin art izi etkisinde kalmaktadır ancak içinde olmadığı elde edilen sürüklenme katsayısı değerinden anlaşılmaktadır. $L/D = 7$ durumu için ise mansap silindiri için elde edilen sürüklenme katsayısı tek başlıksız silindirden %49 daha küçük çıkmaktadır.

Bu durumda en büyük boşluk oranı olan $L/D = 7$ de dahi mansap silindiri memba silindirinin art izinden etkilenmektedir.

- Memba silindirleri incelendiğinde; $L/D = 2$ durumunda $C_{Lbaşlıklı, memba} = -0,84$, $L/D = 4$ durumu için $C_{Lbaşlıklı, memba} = -0,78$ ve $L/D = 7$ durumu için $C_{Lbaşlıklı, memba} = -1,65$ değerini almıştır. Başlıklı tek silindir için ise $C_{Lbaşlıklı} = -1,48$ değeri elde edilmiştir. $L/D = 7$ durumu için negatif kaldırma katsayısı çok büyük çıkmaktadır.
- Başlıklı silindirin membada olduğu (SxS) ve (SxN) durumlarında memba silindirine etki eden kaldırma katsayıları maksimum %0,06 farklı çıkmaktadır. Başlıklı silindir mansabına yerleştirilen silindirin başlıklı olup olmaması sürüklenme katsayısında olduğu gibi kaldırma katsayısı üzerinde de bir etki oluşturmamaktadır.
- Mansap silindirleri incelendiğinde; $L/D = 2$ durumunda $C_{Lbaşlıksız, mansap} = 0,20$, $L/D = 4$ durumu için $C_{Lbaşlıksız, mansap} = 0,02$ ve $L/D = 7$ durumu için $C_{Lbaşlıksız, mansap} = 0,06$ değerini almıştır. $L/D = 4$ ve 7 durumlarında mansap silindirinde kaldırma etkisi görülmezken; $L/D = 2$ olan en küçük boşluk oranında pozitif bir kaldırma etkisi oluşmuştur.
- Memba silindirlerin $0,5D$ kadar arkasında yapılan hız ölçümlerinden elde edilen Strouhal sayıları değerlendirildiğinde $L/D = 2$ için $St = 0,13$ olurken; $L/D=4$ durumunda $St = 0,14$ ve $L/D = 7$ durumunda $St = 0,16$ değerini almıştır. Tek silindir (S) durumunda $St = 0,13$ değerini almıştır.
- Mansap silindirlerin $0,5D$ kadar arkasında yapılan hız ölçümlerinden elde edilen Strouhal sayıları değerlendirildiğinde $L/D = 2$ durumunda $St = 0,13$ $L/D = 4$ iken $St=0,15$ ve $L/D = 7$ de $St = 0,16$ değerini almıştır.
- $L/D = 7$ durumlarında memba ve mansap silindirlerinin akım frekansları ve St sayıları tek silindirden daha büyük olmaktadır.
- Başlıklı silindirin membada olduğu (SxS) ve (SxN) durumlarında akım frekansları ve St sayıları hem memba silindiri hem de mansap silindiri arkasında aynı olmaktadır.

4.8. Membra Başlıksız ve Mansap Başlıklı Silindirin Arka Arkaya Yerleştirilmesi (NxS) Durumunda Boşluk Etkisi

Membada başlıklı ve mansapta başlıksız silindir olduğu durumda $L/D = 2, 4$ ve 7 olmak üzere üç farklı boşluk oranının etkisi incelenmiştir.

- Membra silindirleri incelendiğinde; $L/D = 2$ durumunda $C_{D\text{başlıksız, memba}} = 1,29$, $L/D=4$ durumu için $C_{D\text{başlıksız, memba}} = 1,41$ ve $L/D = 7$ durumu için $C_{D\text{başlıksız, memba}} = 1,81$ değerini almıştır. Başlıksız tek silindir için ise $C_{D\text{başlıksız}} = 1,73$ değeri elde edilmiştir.
- Başlıksız silindirin membada olduğu (NxN) ve (NxS) durumlarında memba silindirine etki eden sürüklenme katsayıları maksimum %0,09 farklı çıkmaktadır. Başlıksız silindir mansabına yerleştirilen silindirin başlıklı olup olmaması sürüklenme katsayısı üzerinde bir etki oluşturmamaktadır.
- Mansap silindirleri incelendiğinde; $L/D = 2$ durumunda $C_{D\text{başlıklı, mansap}} = 0,61$, $L/D = 4$ durumu için $C_{D\text{başlıklı, mansap}} = 1,28$ ve $L/D = 7$ durumu için $C_{D\text{başlıklı, mansap}} = 1,10$ değerini almıştır. L/D oranının 2 olması durumunda mansap silindiri memba silindiri art izi bölgesi içinde kaldığı duman görüntülerinden belli olsa da, başlıksız silindir mansabındaki başlıklı silindirde sürüklenme etkisi görülmektedir.
- Membra silindirleri incelendiğinde; $L/D = 2$ durumunda $C_{L\text{başlıksız, memba}} = -0,05$, $L/D = 4$ durumu için $C_{L\text{başlıksız, memba}} = -0,06$ ve $L/D = 7$ durumu için $C_{L\text{başlıksız, memba}} = -0,08$ değerini almıştır. Başlıksız silindir mansabına yerleştirilen silindirin başlıklı olması kaldırmada bir etki oluşturmamış, başlıksız silindire kaldırma kuvveti etki etmemiştir.
- Mansap silindirleri incelendiğinde; $L/D = 2$ durumunda $C_{L\text{başlıklı, mansap}} = -0,75$, $L/D = 4$ durumu için $C_{L\text{başlıklı, mansap}} = -1,17$ ve $L/D = 7$ durumu için $C_{L\text{başlıklı, mansap}} = -1,37$ değerini almıştır. Başlıksız silindir mansabındaki başlıklı silindire etki eden kaldırma katsayısı boşluk oranı arttıkça negatif olarak artmaktadır. L/D oranının 2 olması durumunda mansap silindiri memba silindiri art izi bölgesi içinde kaldığı duman görüntülerinden belli

olsa da, başlıksız silindir mansabındaki başlıklı silindirde sürüklenme etkisi gibi kaldırma etkisi de görülmektedir.

- Memba silindirlerin 0,5D kadar arkasında yapılan hız ölçümlerinden elde edilen Strouhal sayıları değerlendirildiğinde $L/D = 2$ durumunda bir frekans piki elde edilemediğinde değer elde edilememiştir. $L/D = 4$ durumunda da $L/D = 7$ durumunda da $St = 0,20$ değerini almıştır. Tek silindir (N) durumunda $St = 0,21$ değerini almıştır.
- Mansap silindirlerin 0,5D kadar arkasında yapılan hız ölçümlerinden elde edilen Strouhal sayıları değerlendirildiğinde $L/D = 2$ durumunda $St = 0,17$ $L/D = 4$ iken $St = 0,14$ ve $L/D = 7$ de $St = 0,13$ değerini almıştır. $L/D = 7$ durumunda elde edilen St sayısı başlıklı silindirin tek başına olduğu durumla aynı değeri almıştır.

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında taban etkisinin olmadığı dairesel silindir etrafındaki akım; Reynolds sayısının 14000 olması durumunda deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Silindire başlık eklenmesinin etkisinin araştırıldığı çalışmada başlıksız tek silindir ve başlıklı tek silindir durumları ile birlikte silindirlerin $L/D = 2, 4$ ve 7 olarak üç farklı boşluk oranında arka arkaya yerleştirilmesi durumu da incelenmiştir. Arka arkaya yerleştirilmiş silindirler her ikisinin de başlıklı ve her ikisinin de başlıksız olduğu durum ile memba silindiri başlıklı mansap silindiri başlıksız ve memba silindiri başlıksız mansap silindiri başlıklı olacak şekilde çalışılmıştır. Başlık konfigürasyonları anlaşılabilir olması amacıyla N, S, NN, NS, SN ve SS olarak isimlendirilmiştir. Deneysel çalışmalarda duman teli ile akım görüntüleme deneyi, aerodinamik kuvvet ölçüm deneyi, sıcak tel anemometresi ile hız ölçüm deneyi ve basınç ölçüm deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deneysel veriler ile duman deneyi görselleri ile akım görüntüleri verilmiştir. Silindirlere etki eden kaldırma ve sürüklenme katsayıları hesaplanarak tablo halinde sunulmuştur. Silindire etki eden basınç katsayıları hesaplanarak silindirlik koordinatlarda basınç katsayısı dağılımları verilmiştir. Silindirlerin $0,5D$ kadar art izinde hız profilleri oluşturulmuş, ayrıca silindir etrafındaki anlık hız alanı ölçümlerinden vorteks kopması frekansına bağlı olan Strouhal sayısının değişimi incelenmiştir. Yapılan deneyler *ANSYS FLUENT* programı ile modellenerek deneysel çalışma ile uyumluluğu araştırılmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

N ve S durumu olan tek silindirler ile yapılan deneysel sonuçlara göre N durumunda silindire kaldırma kuvveti etki etmezken, başlık eklenmesi durumunda silindire negatif kaldırma kuvveti etki etmektedir.

Silindire başlık eklenmesi durumunda art izi bölgesinde düşük basınç alanı büyümektedir. Bu durum sonucu başlıklı silindire etki eden sürüklenme kuvveti başlıksız durumdan büyük olmaktadır.

Silindirlerin arka arkaya yerleştirilmesi durumlarında $L/D = 2$ boşluk oranında mansap silindiri memba silindirinin art izi bölgesi içinde kalmakta, silindirler eliptik bir silindir gibi tek girdap kopması hareketi yapmaktadır.

Başlıksız silindirin membada olduğu NN ve NS durumlarında memba silindirine etki eden sürüklenme katsayıları maksimum %0,09 farklı çıkmaktadır. Başlıksız silindir mansabına yerleştirilen silindirin başlıklı olup olmaması sürüklenme katsayısı üzerinde bir etki oluşturmamaktadır.

Arka arkaya yerleştirilen silindirlerin ikisinin de başlıksız olması olan NN durumunda kaldırma etkisi olamamaktadır.

Başlıklı silindirin membada olduğu SS ve SN durumlarında memba silindirine etki eden kaldırma katsayıları maksimum %0,06 farklı ve sürüklenme katsayıları maksimum %0,04 farklı çıkmaktadır. Başlıklı silindir mansabına yerleştirilen silindirin başlıklı olup olmaması sürüklenme katsayısında olduğu gibi kaldırma katsayısı üzerinde de bir etki oluşturmamaktadır.

Silindirlerin arka arkaya yerleştirildiği tüm durumlarda mansap silindirleri negatif basınç alanı etkisinde kalmaktadır. Mansap kısmına yerleştirilen silindir hızın artıp vakum etkisi olmasına yani basıncın negatif olmasına neden olmaktadır.

Duman görüntüleri değerlendirildiğinde silindir art izi bölgesi genişledikçe silindire etki eden sürüklenme katsayısı artmaktadır.

Yapılan analiz sonuçlarına göre silindirin başlıksız olması durumunda SST k- ω türbülans modeli akımı modelleme konusunda başarılı sonuç vermektedir.

Silindirin başlıklı olması durumunda standart k- ϵ türbülans modeli akımın modellenmesinde SST k- ω türbülans modeline göre daha uygun sonuçlar vermektedir.

5.2. Öneriler

Bu tez kapsamında yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda gelecek çalışmalar için yapılan öneriler aşağıda özetlenmiştir.

Bu çalışma taban etkisinin olmadığı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Silindire başlık eklenmesinin oyulma üzerindeki etkilerinin incelemesi için yapılan çalışmalar taban etkisinin olduğu durum için deneysel ve sayısal olarak yapılabilir.

Sıcak tel anemometresi ile yapılan deneylerde hız alanı belirlemek oldukça zahmetli ve zor olduğundan PIV sistemi ile hız ölçümleri gerçekleştirilebilir.

$L/D = 2, 4$ ve 7 durumlarının araştırıldığı bu çalışmada silindirlerin arka arkaya yerleştirilmesi durumlarında boşluk oranı etkisinin daha detaylı belirlenebilmesi için yapılan çalışmalar referans alınarak farklı boşluk oranları sayısal olarak çoğaltılabilir.

SN ve NS başlık konfigürasyonlarında farklı sayısal çözüm yöntemleri ve türbülans modelleri kullanılarak teorik verilerin deneyler ile doğrulanması konusunda yapılacak araştırmalar çoğaltılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] F. M. White, Fluid Mechanics, Seventh Ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2009.
- [2] H. Schlichting and K. Gersten, Boundary-Layer Theory. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [3] C. H. K. Williamson, “Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers,” **Journal Fluid Mechanics.**, **206**, pp. 579–627, 1989.
- [4] M. S. Bloor, “The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder,” **Journal Fluid Mechanics.**, **19** (2), pp. 290–304, 1964.
- [5] J. H. Gerrard, “The wakes of cylindrical bluff bodies at low Reynolds number,” **Philosophical Transactions Royal Society A Mathematical Physical Sciences**, **288** (1354), Mar.23, 1978, pp. 351–382, Mar. 1978.
- [6] G. Schewe, “On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers,” **Journal Fluid Mechanics**, **133**, pp. 265–285, 1983.
- [7] S. Taneda, “Experimental investigation of vortex streets,” **Journal of the Physical Society of Japan**, **20** (9) pp. 1714–1721, 1965.
- [8] P. W. Bearman and M. M. Zdravkovich, “Flow around a circular cylinder near a plane boundary,” **Journal Fluid Mechanics**, **89** (1), pp. 33–47, 1978.
- [9] G. Buresti and A. Lanciotti, “Vortex shedding from smooth and roughened cylinders in cross-flow near a plane surface,” **Royal Aeronautical Society**, **30** (1), pp. 305–321, 1979.
- [10] M. M. Zdravkovich, “Intermittent flow separation from flat plate induced by a nearby circular cylinder,” *In Proceeding of the 2nd International Symposium on Flow Visualization*, 1980, pp. 265–270.
- [11] A. J. Grass, P. W. J. Raven, R. J. Stuart, and J. A. Bray, “The influence of boundary layer velocity gradients and bed proximity on vortex shedding from free spanning pipelines,” *Annual Offshore Technology. Conferance*, vol. 1983-May, pp. 103–

112, 1983.

- [12] S. Taniguchi and K. Miyakoshi, "Fluctuating fluid forces acting on a circular cylinder and interference with a plane wall - Effects of boundary layer thickness," **Experiments in Fluids**, **9** (4), pp. 197–204, 1990.
- [13] J. Sumer, B. M. , Fredsoe, *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*. Singapore, 1997.
- [14] C. Lei, L. Cheng, and K. Kavanagh, "Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder," **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, **80** (3), pp. 263–286, 1999.
- [15] S. J. Choi, J. H., Lee, "Ground effect of flow around an elliptic cylinder in a turbulent boundary layer," **Journal of Fluids and Structures**, **14**, pp. 697–710, 2000.
- [16] H. Nishimura and Y. Taniike, "Aerodynamic characteristics of fluctuating forces on a circular cylinder," **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, **89** , no. 7–8, pp. 713–723, 2001.
- [17] M. P. P. S. J. Price, D. Summer, J. G. Smith, K. Leong, "Flow visualization around a circular cylinder near to a plane wall," **Journal of Fluids and Structures**, **16**, pp. 175–11, 2001.
- [18] S. Cokgor and I. Avci, "Hydrodynamic forces on partly buried tandem, twin pipelines in current," **Ocean Engineering**, **28**, pp. 1349–1360, 2001.
- [19] F. Hatipoglu and I. Avci, "Flow around a partly buried cylinder in a steady current," **Ocean Engineering**, **30**, pp. 239–249, 2003.
- [20] M. M. Zdravkovich, *Flow Around Circular Cylinders*, Vol. 2. New York: Oxford University Pres Inc., 2003.
- [21] M. H. Wu, C. Y. Wen, R. H. Yen, M. C. Weng, and A. B. Wang, "Experimental and numerical study of the separation angle for flow around a circular cylinder at low Reynolds number," **Journal of Fluid Mechanics**, **515**, pp. 233–260, 2004.
- [22] D. Liang, L. Cheng, and F. Li, "Numerical modeling of flow and scour below a pipeline in currents. Part II. Scour simulation," **Coastal Engineering**, **52** (1), pp.

43–62, 2005.

- [23] M. Ozgoren, “Flow structure in the downstream of square and circular cylinders,” **Flow Measurement and. Instrumentation**, **17**, pp. 225–235, 2006.
- [24] M. S. Kirkgoz, A. A. Oner, and M. S. Akoz, “Numerical modeling of interaction of a current with a circular cylinder near a rigid bed,” **Advancers in Engineering Software**, **40** (11), pp. 1191–1199, 2009.
- [25] M. S. Aköz, O. Şimşek, and N. G. Soydan, “Numerical modeling of interaction of turbulent flow with a buried circular cylinder on a plane surface,” **Teknik. Dergi/Technical Journal of Turkish Chamb Civil Engineering**, **30** (6), pp. 9621–9645, 2019.
- [26] C. H. Hulsbergen, “Spoilers for stimulated self-burial of submarine pipelines,” in *Eighteenth Annual Offshore Technology Conference, (Houston, U.S.a.: May 5-8, 1986)*, 1986, vol. 4, Richar, no. 1, pp. 441–444.
- [27] C. H. Hulsbergen and R. Bijker, “Effect of spoilers on submarine pipeline stability,” in *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, 1989, vol. 1989-May, pp. 337–366.
- [28] Y. M. Chiew, “Effect of spoilers on wave-induced scour at submarine pipelines,” *J. Waterw. Port, Coastal Ocean Engineering*, **119** (4), pp. 417–428, 1993.
- [29] R. Bijker, “Achieving subsea pipeline burial and stability with spoilers,” **Pipeline&Gas Journal**, **227** (4), , p. 46, 2000.
- [30] L. W. Chew and L. Cheng, “Effect of Spoilers on Flow Around Submarine Pipelines,” in *International offshore and polar engineering conference*, 2001, vol. 1, pp. 126–130.
- [31] L. Cheng and L. W. Chew, “Modelling of flow around a near-bed pipeline with a spoiler,” **Ocean Engineering**, **30**, pp. 1595–1611, 2003.
- [32] A. A. Öner, “Başlığın Boru Hattı Etrafindaki Akıma Etkisi,” **Yapı Teknol. Elektronik Dergisi**, **1** , pp. 1–11, 2008.
- [33] A. A. Oner, “The flow around a pipeline with a spoiler,” **Proceedings Institution ogf Mechanical Engineering**. **224**, 1, p. 109–121, 2010.

- [34] H. Zhu, X. Qi, P. Lin, and Y. Yang, “Numerical simulation of flow around a submarine pipe with a spoiler and current-induced scour beneath the pipe,” **Applied Ocean Research**, **41**, pp. 87–100, 2013.
- [35] S. Abbasi, M. Masoomi, and S. Arjmandi, “Impact of a Single Spoiler on Scouring Depth Status Beneath a River Crossing Inclined Pipeline,” **Engineering Technology Applied Science Research**, **8** (5), pp. 3316–3320, 2018.
- [36] A. A. Öner, “Numerical investigation of flow around a pipeline with a spoiler near a rigid bed,” **Advance Mechanical Engineering**, **8** (6), pp. 1–13, 2016.
- [37] J. R. Meneghini, F. Saltara, C. L. R. Siqueira, and J. A. Ferrari, “Numerical simulation of flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements,” **Journal of Fluids Structure**, **15**, pp. 327–350, 2001.
- [38] M. Arie, M. Kiya, M. Moriya, and H. Mori, “Pressure fluctuations on the surface of two circular cylinders in tandem arrangement,” **Journal Fluids Engineering**, **105** (2) ASME, 1983.
- [39] T. Kitagawa and H. Ohta, “Numerical investigation on flow around circular cylinders in tandem arrangement at a subcritical Reynolds number,” **Journal of Fluids Structure**, **24**, pp. 680–699, 2008.
- [40] M. Zhao, S. Vaidya, Q. Zhang, and L. Cheng, “Local scour around two pipelines in tandem in steady current,” **Coastal Engineering**, **98**, pp. 1–15, 2015.
- [41] M. Abrahamsen Prsic, M. C. Ong, B. Pettersen, and D. Myrhaug, “Large Eddy simulations of flow around tandem circular cylinders in the vicinity of a plane wall,” **Journal of Marine Science and Technology**, **24** (2) , pp. 338–358, 2019.
- [42] D. Hu, W. Tang, L. Sun, F. Li, X. Ji, and Z. Duan, “Numerical simulation of local scour around two pipelines in tandem using CFD–DEM method,” **Applied Ocean Research**, **93**, 2019.
- [43] G. Schewe, N. P. van Hinsberg, and M. Jacobs, “Investigation of the steady and unsteady forces acting on a pair of circular cylinders in crossflow up to ultra-high Reynolds numbers,” **Experimenta Fluids**, **2** (8), no. 8, Aug. 2021.
- [44] M. Damroudi, K. Esmaili, and S. H. Rajaei, “Effect of Pipeline External Geometry

- on Local Scour and Self-Burial Time Scales in Current,” **Journal of Applied Fluid Mechanics**, **14** (1), pp. 103–115, 2020.
- [45] Z. Enjin, B. Shi, Q. U. Ke, D. Wenbin, and Z. Jing, “Experimental and Numerical Investigation of Local Scour Around Submarine Piggyback Pipeline Under Steady Current,” **Journal of Ocean University China**, **17** (2), pp. 244–256, 2018.
- [46] L. Zhu *et al.*, “Scour Beneath and Adjacent to Submarine Pipelines with Spoilers on a Cohesive Seabed: Case Study of Hangzhou Bay, China,” **Ocean Engineering**, **145** (1), p. 05018009, 2019.
- [47] V. Jabari, A. Masjedi, M. Heidarnejad, A. Kamanbedast, and A. Bordbar, “Scour control around Submerged pipeline on the river bed using an impermeable Spoiler,” **Ain Shams Engineering Journal**, **12** (1) , pp. 37–45, 2021.
- [48] M. S. Genc, İ. Karasu, and H. H. Acıkel, “An experimental study on aerodynamics of NACA2415 aerofoil at low Re numbers,” **Experimental Thermal Fluid Science**, **39**, pp. 252–264, 2012.
- [49] M. Serdar Genç, H. Hakan Açık, and K. Koca, “Effect of partial flexibility over both upper and lower surfaces to flow over wind turbine airfoil,” **Energy Conversion Management**, **219**, p. 113042, Sep. 2020.
- [50] İ. Karasu, “Düşük Reynolds Sayılı Akışlarda Kanat Profili Üzerinde Türbülansa Geçişin ve Laminer Ayrılma Kabarcığının Deneysel ve Sayısal İncelenmesi,” Erciyes Üniversitesi, 2011.
- [51] “ANSYS,” 2018. [Online]. Available: <https://www.ANSYS.com/>.
- [52] C. Lei, L. Cheng, S. W. Armfield, and K. Kavanagh, “Vortex shedding suppression for flow over a circular cylinder near a plane boundary,” **Ocean Engineering**, **27** (10), pp. 1109–1127, Oct. 2000.
- [53] J. Tu, guan-heng Yeoh, and chaoqun Liu, *Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Temelleri ve Uygulamaları*, 3rd ed. Palme Yayınevi, 2020.
- [54] P. J. Roache, “Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies,” **Journal of Fluids Engineering**, **116** (3), pp. 405–413, Sep. 1994.
- [55] P. J. Roache, “Verification of Codes and Calculations,” **AIAA Journal**, **36** (5) ,

1998.

- [56] P. J. Roache, “Quantification Of Uncertainty In Computational Fluid Dynamics,” **Annual Review Fluid Mechanics**, **29**, pp. 123–60, 1997.
- [57] L. Davidson, “Numerical Methods for Turbulent Flow. MTF071 Lecture Notes,” Göteborg, 2005.
- [58] B. E. Launder and D. B. Spalding, “Lectures in Mathematical Models of Turbulence,” *Acad. Press*, p. 176, 1972.
- [59] B. E. Launder, G. J. Reece, and W. Rodi, “Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure,” **Journal Fluid Mechanics**, **68** (3), pp. 537–566, 1975.
- [60] D. C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, First Edit. California: DCW Industries, Inc., 1998.
- [61] F. R. Menter, “Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications,” **AIA A Journal**, **32** (8), 1994.
- [62] P. Bradshaw, *Effects of Streamline Curvature on Turbulence*. London, 1973.
- [63] Weidner Steve, “Fluent Learning Modules,” Cornell University, 2020. [Online]. Available:
[https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+Learning+Modules.](https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+Learning+Modules)

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Mücella İLKENTAPAR
Uyuğu: Türkiye (T.C)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü	2015
Lisans	Erciyes Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü	2012
Lise	Fahrettin Kerim Gökay Anadolu Lisesi/İstanbul	2008

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2012-Halen	Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Arş. Gör.

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

Scı, Sscı Ve Ahcı İndekslerine Giren Dergilerde Yayınlanan Makaleler

Uncuoğlu E., Citakoglu H., Latifoglu L., Bayram S., Laman M., **İlkentapar M.**, Oner A. A., Comparison of neural network, Gaussian regression, support vector machine, long short-term memory, multi-gene genetic programming, and M5 Trees methods for solving civil engineering problems, *Applied Soft Computing*, 2022, 109623

Diğer Dergilerde Yayınlanan Makaleler

İlkentapar M., Öner A. A., 2017. Geniş Başlıklı Savak Etrafındaki Akımın İncelenmesi, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt.6, sa.2, ss.615-626

Hakemli Kongre / Sempozyum Bildiri Kitaplarında Yer Alan Yayınlar

- 1- İlkentapar M., Öner A.A., Kocaman S. , 2018, ss.10-11. Numerical Modelling of Flow over a Broad-Crested Weir. *International Congress on Engineering and Life Science, Kastamonu, Türkiye.*
- 2- İlkentapar M., Akşit S., Öner A.A., 2017. Numerical Modeling of Flow over a Rectangular Broad-Crested Weir. *2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress, Adana, Türkiye.*
- 3- Akşit S., İlkentapar M., Öner A.A., 2017. Experimental and Numerical Modeling of Sluice Gate Flow *International Conference on Civil and Environmental Engineering, Nevşehir, Türkiye.*
- 4- Ardıçlıoğlu M., İlkentapar M., 2015. Açık Kanal Savak Akımlarında Debinin Farklı Yöntemler ile Belirlenmesi *4. Su Yapıları Sempozyumu, Antalya, Türkiye.*
- 5- Ardıçlıoğlu M., İlkentapar M., 2015. Investigation of Flow Properties Over the Broad Crested Weir by Experimental and HEC-RAS Package *International Congress On Natural And Engineering Sciences, Sarayova, Bosna-Hersek.*
- 6- Genç O., Ardıçlıoğlu M., Ağırlioğlu N., Vapur M. 2013. Taşkınlarda Akım Özelliklerinin Derinliğe Bağlı Belirlenmesi, *Taşkın ve Heyelan Sempozyumu, Trabzon, Türkiye.*